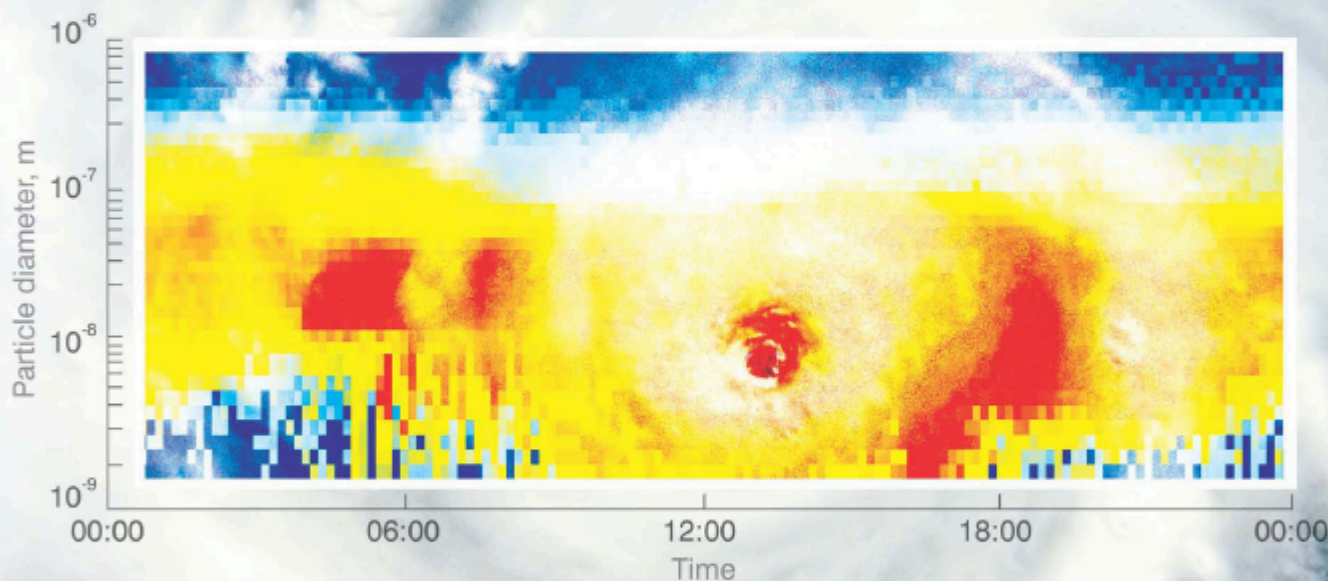


IAN COLBECK | MIHALIS LAZARIDIS

AEROSOL SCIENCE

TECHNOLOGY AND APPLICATIONS



WILEY

Наука об аэрозолях

Наука об аэрозолях

Технология и приложения

ЯН КОЛБЕК

Школа биологических наук,

Эссекский университет, Великобритания

МИХАЛИС ЛАЗАРИДИС

Инженерный факультет окружающей среды,

Технический университет Крита, Греция

WILEY

Это издание впервые опубликовано в
2014 году © 2014 John Wiley & Sons Ltd.

Зарегистрированный офис

John Wiley & Sons Ltd, Атриум, Южные ворота, Чичестер, Западный Сассекс, PO19 8SQ, Великобритания

Для получения подробной информации о наших редакциях по всему миру, об обслуживании клиентов и о том, как подать заявку на получение разрешения на повторное использование материалов, защищенных авторским правом, в этой книге, пожалуйста, посетите наш веб-сайт по адресу www.wiley.com. Право автора быть идентифицированным как автор этого произведения было заявлено в соответствии с Законом об авторском праве, промышленных образцах и патентах 1988 года. Все

права защищены. Никакая часть этой публикации не может быть воспроизведена, сохранена в поисковой системе или передана в любой форме или любыми средствами, электронными, механическими, копируемыми, записываемыми или иными, за исключением случаев, разрешенных Законом Великобритании об авторских правах, образцах и патентах 1988 года, без предварительного разрешения издателя. Wiley также публикует свои книги в различных электронных форматах. Некоторые материалы, опубликованные в печатном виде, могут быть недоступны в электронных книгах. Обозначения, используемые

компаниями для отличия своей продукции, часто являются как товарные знаки. Все названия торговых марок и продуктов, используемые в этой книге, являются торговыми наименованиями, знаками обслуживания, товарными знаками или зарегистрированными товарными знаками соответствующих владельцев. Издатель не связан ни с каким продуктом или поставщиком, упомянутыми в этой книге.

Ограничение ответственности / Отказ от гарантий: Хотя издатель и автор приложили все усилия при подготовке этой книги, они не делают никаких заявлений или гарантий относительно точности или полноты содержания этой книги и конкретно отказываются от любых подразумеваемых гарантий товарной пригодности или пригодности для определенной цели. Она продается при том понимании, что издатель не занимается оказанием профессиональных услуг и ни издатель, ни автор не несут ответственности за возникший в связи с этим ущерб. Если требуется профессиональная консультация или иная экспертная помощь, следует обратиться к услугам компетентного специалиста. Рекомендации и стратегии, содержащиеся в настоящем документе, могут подходить не для каждой ситуации. В связи с проводимыми исследованиями, модификациями оборудования, изменениями в правительственных постановлениях и постоянным потоком информации, касающейся использования экспериментальных реагентов, оборудования и приспособлений, читателю настоятельно рекомендуется просмотреть и оценить информацию, представленную на упаковке или в инструкциях по каждому химическому веществу, элементу оборудования, реагенту или устройству, среди прочего, на предмет любых изменений в инструкциях или указаний по использованию, а также дополнительных предупреждений и мер предосторожности. Тот факт, что организация или веб-сайт упоминаются в этой работе в качестве цитаты и / или потенциального источника дополнительной информации, не означает, что автор или издатель одобряют информацию, которую может предоставить организация или Веб-сайт, или рекомендации, которые она может дать. Далее, читатели должны знать, что интернет-сайты, перечисленные в этой работе, могли измениться или исчезнуть в период между написанием этой работы и ее прочтением. Никакие рекламные заявления на это произведение не могут создавать или расширять гарантии. Ни издатель, ни автор не несут ответственности за любой ущерб, возникший в связи с этим.

Каталогизация публикуемых данных Библиотеки Конгресса

Наука об аэрозолях: технология и приложения / под редакцией Яна Колбека, Михалиса Лазаридиса.

страниц см

Включает указатель. ISBN 978-1-119-97792-6
(ткань)

1. Аэрозоли - промышленное применение. 2. Аэрозоли-экологические аспекты.
И. Колбек, И. (Ян), редактор сборника. II. Лазаридис, Михалис, редактор сборника

TP244.A3A336 2014
660.294515-dc23

2013028905

С каталожной записью этой книги можно ознакомиться в Британской библиотеке.

ISBN: 978-1-119-97792-6

Набор в 10-12-дюймовом переплете от Laserwords Private Limited, Ченнаи, Индия

Содержание

<i>Список участников</i>	XIII
<i>Предисловие</i>	XV
1. Введение	1
<i>Михалис Лазаридис и Ян</i>	
Колбек 1.1.1.2 Введение	1
Размер и форма 1.3	5
Распределение по размерам	6
1.4 Химический состав 1.5	10
Измерения и отбор проб	11
Ссылки	12
2. Динамика аэрозоля	15
<i>Михалис Лазаридис и</i>	
<i>Яннис Дресидис</i>	
2.1 2.2 Общее	15
динамическое уравнение	17
Дискретное распределение частиц по размерам	18
Непрерывное распределение частиц по размерам	19
2.3 Зарождение: образование новых частиц	19
2.3.1 Классическая теория зарождения	20
2.3.2 Многокомпонентное зарождение	22
2.3.3 Гетерогенное зарождение	23
2.3.4 Атмосферное зарождение	24
2.4 Рост за счет конденсации	26
2.5 Коагуляция и агломерация	27
2.5.1 Броуновская	28
коагуляция 2.5.2	32
2.6 Агломерационные	32
механизмы осаждения 2.6.1	32
Закон Стокса 2.6.2	34
Гравитационное осаждение 2.6.3	34
Осаждение диффузией	34
2.6.4 Осаждение ударом	35
2.6.5 Форетические	36
Осаждение атмосферного аэрозоля	
эффекты 2.6.6 2.6.7	
Осаждение в дыхательных путях человека	

2.7	Ресуспензия	38
2.7.1	2.7.2 Однослойная ресуспензия	38
Список	Многослойная ресуспензия	39
	литературы	41
3.	Рекомендации по отбору проб аэрозоля	45
	<i>Альфред Виденсолер, Вольфрам Бирмили, Жан-Филипп Путо и Дэвид Ю. Х. Пуи</i>	
	Введение 3.1 3.2 Рекомендации	45
	по стандартизированному отбору проб аэрозолей	46
3.2.1	Общие рекомендации Стандартизация	46
3.2.2	входных отверстий для	47
3.2.3	аэрозоля Контроль влажности	49
3.3	Конфигурации	53
отбора проб	Общие аспекты движения частиц Конфигурация	53
бетона 3.3.1	отбора проб в ламинарном потоке Конфигурация	54
3.3.2 3.3.3.3	отбора проб в турбулентном потоке	55
		57
3.4	Отбор проб без артефактов для	59
	анализа органического углерода	59
	Благодарности Ссылки	59
4.	Аэрозольное оборудование	61
	<i>Да-Рен Чен и Дэвид Ю. Х. Пуи</i>	
	Введение 4.1	61
4.2	Общая стратегия	62
4.3	Входные отверстия для отбора проб	63
4.4	аэрозоля и транспортировка	64
	Измерение интегрального момента 4.4.1	
	Измерение общей количественной концентрации:	
	Конденсационный счетчик частиц (CPC)	65
4.4.2	Измерение общей массовой концентрации:	
	Кварцевые микровесы (QCM) и конические	
	колебательные микровесы (TEOM) ,	66
4.4.3	светорассеивающие фотометры и нефелометры	67
4.5	Измерение площади	68
4.6	поверхности частиц	70
	Измерение Методы, основанные на взаимодействии частиц со	70
	распределением Методы, основанные на инерции частиц,	71
	4.6.2 4.6.3 Методы, основанные на электрической подвижности	74
	4.6.4 Измерение частиц, Методы, основанные на диффузии частиц	77
	химического состава	78
4.7	Закключение	80
4.8	Список литературы	82
5.	Механизмы	89
	фильтрации <i>Сара Даннетт</i>	
	Введение	89

5.2	Механизмы	91
	осаждения 5.2.1	92 96
	Модели потоков диффузионное осаждение	98
	5.2.2 5.2.3 Осаждение путем перехвата	99
	5.2.4 5.2.5 5.2.6 Осаждение за счет инерционного	100
	Факторы, воздействия Гравитационное	100
	влияющие на осаждение Электростатическое осаждение	104
5.3	эффективность	104
	5.3.1 Отскок	106
	частиц 5.3.2	109
5.4	Случайность загрузки	109
5.5	частиц в фильтр	110
5.6	Приложения Выводы	110
	Номенклатура	110
	Список литературы	113
6.	Дистанционное зондирование атмосферных аэрозолей	119
	<i>Saizlik Дей и Саччида Нанд</i>	
	<i>Трипати</i> 6.1.6.2 Введение	119
	Дистанционное зондирование поверхности	120
	Пассивное дистанционное зондирование	120
	Активное дистанционное зондирование	126
6.3	Дистанционное зондирование со спутников	126
	6.3.1 Пассивное дистанционное зондирование	127
	6.3.2 Активный космический лидар	135
	6.3.3 Применение аэрозольных	136
6.4	продуктов спутникового базирования	141
	Краткое изложение и будущие	142
	требования Благодарности Ссылки	142
7.	Зарождение атмосферных частиц	153
	<i>Mikko Sipilä, Katrianne Lehtipalo, and</i>	
	<i>Markku Komppa</i> 7.1.7.2 Обнаружение	153
	атмосферных наночастиц	156
	7.2.1 Подсчет частиц конденсата	156
	7.2.2 Электростатические методы	158
	7.2.3 Масс-спектрометрические методы обнаружения скоплений	160
7.3	Атмосферные наблюдения за образованием новых частиц	163
	Лабораторные	163
	Эксперименты по зарождению	165
7.4	Роста	166
	7.4.1 Нуклеация серной кислотой	166
	7.4.2 Поиск соединения X	168
7.5	Заключительные замечания и	169
	будущие задачи Список литературы	170

8.	Атмосферные аэрозоли и климатические воздействия <i>Мария</i>	181
	<i>Канакиду</i> 8.1 8.2 Глобальное	
	Введение	181
	распределение аэрозолей 8.3	181
	Воздействие аэрозолей на климат 8.4	182
	Моделирование глобального	186
	распределения аэрозолей 8.5	
	Подавление радиации аэрозолями	190
	(прямое воздействие) 8.5.1	
	Оптическая глубина аэрозоля и прямое	
	радиационное воздействие на компоненты аэрозоля,	193
8.6	аэрозоли и облака (косвенное воздействие)	194
	Как аэрозоли	195
8.7	превращаются в CCN и облачные капли 8.6.1	200
8.8	Оценки радиационного воздействия	203
	Дальнейшие действия Ссылки	203
9.	Загрязнение воздуха, здоровье человека и роль аэрозолей <i>Лэт</i>	207
	<i>Гудман и Отто Ханнинен</i> 9.1	
	Предыстория	207
	9.2 Размерные доли	208
	9.3 Какие размеры загрязняющих	209
	частиц важны? 9.4	
	Какие последствия для здоровья связаны с воздействием	209
9.5	загрязнения воздуха? Источники атмосферных аэрозолей	210
9.6	Отложение частиц в легких Механизмы взаимодействия	210
9.7	аэрозолей в организме человека Респираторные	211
9.8	последствия для человека и воздействие аэрозоля сердечно-сосудистые	215
9.9	последствия и воздействие аэрозоля	215
9.10	Выводы и рекомендации	216
	Список литературы	216
10.	Фармацевтические аэрозоли и доставка лекарств в легкие	221
	<i>Дарра Марнейн, Виктория Хаттер и Мари</i>	
	<i>Харанг</i> 10.1 Введение 10.2	221
	Фармацевтические аэрозоли в лечении заболеваний	223
	10.2.1 Астма	223
	10.2.2 Хроническая обструктивная болезнь	224
	легких 10.2.3 Муковисцидоз 10.2.4	224
	Инфекция дыхательных путей 10.2.5 За	225
	пределы легких: системная доставка лекарств	225
	10.3 Физико-химические свойства аэрозоля, имеющие важное значение	226
	для отложения в легких 10.4 Судьба вдыхаемых частиц аэрозоля в легких	228
	10.4.1 Параклеточный транспорт	229
	10.4.2 Межклеточный транспорт	229
	10.4.3 Транспортировка с использованием переносчика	230
	10.4.4 Модели для определения судьбы вдыхаемых аэрозолей	231

10.5 Производство вдыхаемых частиц	233
10.5.1 Истирание и измельчение частиц	233
10.5.2 Получение конструктивных частиц	235
10.6 Системы образования аэрозолей и их доставки для легочной терапии	237
10.6.1 Методы распыленной терапии заболеваний	237
10.6.2 Системы дозированных ингаляторов под давлением	241
10.6.3 Ингаляция сухим порошком	248
10.6.4 Усовершенствованные стратегии доставки лекарств	252
10.7 Тестирование эффективности продукта	253
10.7.1 Испытание на общую излучаемую дозу	253
10.7.2 Определение аэродинамического размера частиц: инерционное воздействие	
Анализ	253
10.8 Заключение и перспективы	255
Список литературы	255
11. Биоаэрозоли и госпитальные инфекции	271
<i>Ка Ман Лай, Захир Ахмад Насир и Джонатан Тейлор</i>	
11.1 Важность биоаэрозолей и инфекций	271
11.2 Инфекции, связанные с биоаэрозолями, в больницах	272
11.3 Свойства биоаэрозоля и его отложение в организме человека	
Дыхательные системы	275
11.4 Цепочка заражения и инфекционный контроль в больницах	275
11.5 Применение аэрозольной науки и технологии в борьбе с инфекцией	277
11.5.1 Понимание госпитальной аэриологии и инфекционного контроля	277
11.5.2 Эксперименты и модели с биоаэрозолями	280
11.5.3 Численный анализ дисперсии частиц в больницах	281
11.5.4 Технологии очистки воздуха	282
11.6 Заключение	285
Список литературы	285
12. Синтез наноструктурированных материалов в газовой фазе	291
<i>Питер В. Пихица и Мансу Чой</i>	
12.1 Введение	291
12.2 Синтез на основе аэрозолей	292
12.3 Пламенный синтез	292
12.4 Пламенный и лазерный синтез	299
12.5 Лазерно-индуцированный синтез	302
12.6 Горение металлического порошка	309
12.7 Искровой разряд	313
12.8 Сборка полезных наноструктур	314
12.9 Выводы	322
Список литературы	323

13. Безопасность новых неорганических и углеродных наноматериалов	327
<i>Л. Рейндерс</i>	
13.1 Введение	327
13.2 Здоровье человека и стойкие к вдыханию искусственные неорганические вещества и углерод Наноматериалы	330
13.3 Опасности для здоровья человека и риски, связанные с приемом стойких веществ Неорганические наноматериалы	333
13.4 Экоотоксичность стойких неорганических и углеродных наноматериалов 13.5 Заключение	335
Список литературы	336
14. Гигиена окружающей среды в застроенных помещениях	345
<i>Захир Ахмад Насир</i>	
14.1 Экологические опасности и искусственная среда	345
14.2 Твердые частицы загрязняющих веществ	348
14.2.1 Перенос и поведение частиц в искусственных средах 14.3 Газовые загрязнители	349
14.3.1 Биологические опасности	351
14.3.2 Физические опасности	357
14.3.3 Эргономические опасности	358
14.3.4 Вентиляция и экологические опасности	359
14.3.5 Энергоэффективная застройка, изменение климата и Санитарное состояние	361
окружающей среды Ссылки	362
15. Выбросы твердых частиц транспортными средствами	369
<i>Джонатан Саймондс</i>	
15.1 Введение	369
15.2 Концепции и технологии двигателей	370
15.2.1 Топливовоздушная смесь	370
15.2.2 Двигатели с искровым зажиганием	371
15.2.3 Двигатели с воспламенением от сжатия 15.2.4 Двухтактные двигатели	372
15.2.5 Газотурбинные двигатели	373
15.3 Образование частиц	373
15.3.1 Образование в цилиндре	373
15.3.2 Изменения в системах выхлопа и доочистки 15.3.3 Негорючие источники твердых частиц 15.3.4 Изменения в окружающей среде	375
15.4 Воздействие выбросов твердых частиц транспортными средствами	376
15.4.1 Воздействие на здоровье и окружающую среду 15.4.2 Законодательство	376

15.5 Методы отбора проб и измерений	378
15.5.1 Обращение с образцами	378
15.5.2 Измерение массы	379
15.5.3 Измерение количества твердых	380
частиц 15.5.4 Методы определения	382
размеров 15.5.5 Определение морфологии	382
15.6 Методы улучшения качества	385
15.6.1 Состав топлива	385
15.6.2 Контроль с помощью	385
конструкции и калибровки	386
двигателя 15.6.3 Сажевые	388
фильтры Благодарности Ссылки	388
16. Перемещение биоаэрозолей в атмосфере и последствия для	
 Климат и эволюция микроорганизмов	393
<i>Синди Э. Моррис, Кристель Лейронас</i>	
<i>и Филипп К. Нико</i> 16.1 Введение	393
16.2 Выбросы: запуск в атмосферу	395
16.2.1 Активный выброс	397
16.2.2 Пассивный выброс	397
16.2.3 Количественная оценка выбросов	398
16.3 Перенос в пограничном слое Земли	399
16.3.1 Транспортные двигатели	399
16.3.2 Количественная оценка приповерхностного потока	400
16.4 Перевозки на большие расстояния: Из пограничного слоя в Свободную	
Тропосферу	404
16.4.1 Масштабы горизонтального переноса на большие расстояния	404
16.4.2 Высота переноса на большие расстояния	405
16.5 Взаимодействие микробных аэрозолей с атмосферными процессами	406
16.6 Последствия воздушного переноса для микробных	
Эволюционная история	407
Ссылки	410
17. Обеззараживание воздушного организмов от ультрафиолетового излучения-С и	
 Солнечный свет	417
<i>Яна С. Кесаван и Хосе-Луис</i>	
<i>Сагрипанти</i> 17.1 Введение	417
17.2 УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ	418
излучение 17.3 Солнечный свет	419
17.4 Отдельные организмы	421
17.4.1 Бактериальные	421
эндоспоры 17.4.2 Вегетативные	422
бактерии 17.4.3 Вирусы	423

17.5 Воздействие ультрафиолетового излучения на находящиеся в аэрозоле организмы	423
17.5.1 Повреждение клеток, вызванное	423
УФ-излучением 17.5.2 Фоторемонт 17.5.3 Типичная	424
кривая выживаемости при УФ-воздействии	425
17.5.4 Константа скорости УФ-излучения	427
17.5.5 Влияние относительной влажности и	428
температуры 17.5.6 Бактериальные кластеры	429
17.6 Дезинфекция помещений с использованием	429
ультрафиолетового излучения 17.7 Исследования воздействия	430
солнечного света 17.8 Рекомендации по тестированию	431
17.8.1 Методика тестирования в	432
нашей лаборатории 17.9 Обсуждение	435
Список литературы	435
 18. Радиоактивные аэрозоли: индикаторы атмосферных процессов	 441
<i>Кацуми Хироэ</i>	
18.1 Введение	441
18.2 Происхождение радиоактивных аэрозолей	442
18.2.1 Природные радионуклиды	442
18.2.2 Антропогенные радионуклиды	444
18.3 Индикаторы атмосферных процессов	446
18.3.1 Транспортировка	446
радиоактивных аэрозолей 18.3.2	448
Сухое осаждение 18.3.3 Влажное	449
осаждение 18.3.4	450
Ресуспендирование 18.3.5 Другие процессы	452
18.3.6 Применение мультитрейсеров	452
18.3.7 Время пребывания радиоактивных	454
аэрозолей в атмосфере 18.4 Индикатор	457
изменения окружающей среды 18.5 Заключение	460
Список литературы	461
 Указатель	 469

Список участников

Wolfram Birmili, Лейбницевский институт тропосферных исследований, Германия

Da-Ren Chen, Факультет машиностроения и ядерной инженерии, Виргинский общий

Университет благосостояния, США

Мансу Чой, Отделение многомасштабного механического проектирования WCU, Школа

механики и аэрокосмической инженерии, Сеульский национальный университет, Южная

Корея **Ян Колбек**, Школа биологических наук, Эссекский университет, Великобритания

Сагник Дей, Центр атмосферных наук, ИИТ Дели, Индия

Яннис Дроссинос, Европейская комиссия, Объединенный исследовательский центр, Италия

Сара Даниетт, факультет авиационной и автомобильной техники,

Университет Лафборо, Великобритания

Пэт Гудман, Школа физики, Институт наук о здоровье окружающей среды, Дублинский

технологический институт, Ирландия

Otto Hänninen, Факультет наук об окружающей среде, Университет Восточной Финляндии,

Финляндия

Мари Харанг, Институт фармацевтических наук, Королевский колледж Лондона,

Великобритания **Кацуми Хиросе**, Кафедра материалов и наук о жизни, Факультет науки и

технологии, Софийский университет, Япония

Виктория Хаттер, фармацевтический факультет, Университет Хартфордшира, Великобритания

Мария Канакиду, Лаборатория химических процессов в окружающей среде, факультет

химии, Критский университет, Греция

Яна С. Кесаван, Химико-биологический центр Эджвуда, Абердинский испытательный полигон,

США **Маркку Кулмала**, физический факультет Хельсинкского университета, Финляндия

Каман Лай, факультет биологии, Гонконгский баптистский университет, Китай

Михалис Лазаридис, факультет инженерии окружающей среды, Технический университет

Крита, Греция

Катрианна Лехтипало, физический факультет Хельсинкского университета, Финляндия

Кристель Лейронас, INRA, UR407 de Pathologie Végétale, France

Синди Э. Моррис, INRA, UR407 de Pathologie Végétale, France

Дарра Марнейн, фармацевтический факультет, Университет Хартфордшира, Великобритания

Захир Ахмад Насир, Центр исследований здоровой инфраструктуры, Департамент гражданской,

экологической и геоматической инженерии, Университетский колледж Лондона, Великобритания

Филипп К. Нико, INRA, UR407 de Pathologie Végétale, France

John Ogren, NOAA ESRL GMD , США

Питер В. Пихица, Отделение многомасштабного механического проектирования WCU, Школа

механики и аэрокосмической инженерии, Сеульский национальный университет, Южная Корея

David Y. H. Pui, Факультет машиностроения, Университет Миннесоты, США

Жан-Филипп Путо, Европейская комиссия, Объединенный исследовательский центр, Италия

Л. Рейндерс, IBED, Амстердамский университет, Нидерланды

Хосе-Луис Сагрипант, Химико-биологический центр Эджвуда, Абердинский испытательный

полигон, США

Mikko Sipilä, Физический факультет Хельсинкского университета, Финляндия

Джонатан Саймондс, Камбустон, Великобритания

Джонатан Тейлор, Исследовательский центр здоровой инфраструктуры, Департамент гражданской,

экологической и геоматической инженерии, Университетский колледж Лондона, Великобритания

Саччида Нанд Трипати, Департамент гражданского строительства, ИИТ Канпур, Индия

Alfred Wiedensohler, Институт тропосферных исследований имени Лейбница, Германия

Предисловие

Аэрозоль представляет собой стабильную суспензию твердых и жидких частиц в газе. Аэрозоли распространены повсеместно в окружающей среде и очень важны для общественного здравоохранения. Важно, чтобы мы понимали их динамику, чтобы иметь возможность количественно оценить их воздействие на людей. Взвешенные в воздухе твердые частицы представляют собой сложную смесь множества различных химических веществ, происходящих из различных источников. Твердые частицы могут выступать в качестве транспортной среды для нескольких химических соединений, а также для поглощенных или адсорбированных на них биологических материалов. Наука и технология в области аэрозолей значительно продвинулись вперед за последние 20 лет, при этом особый интерес вызывают ультрадисперсные частицы не только из-за их полезных свойств, но и из-за их промышленного применения.

Частицы в атмосфере оказывают важное воздействие как на загрязнение воздуха, так и на климат. Также растет обеспокоенность тем, что террористические акты могут привести к загрязнению атмосферы химическими, биологическими или радиологическими материалами. Однако, аэрозоли были оценены Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) как имеющие наибольшую неопределенность в отношении радиационного воздействия. Геоинженерия была предложена в качестве возможного способа смягчения последствий изменения климата, причем многие из предложенных подходов включают впрыскивание аэрозолей в атмосферу.

В этой книге рассматривается технологическое применение аэрозольной науки, а также текущее научное состояние моделирования и измерений аэрозолей. В нем представлены фундаментальные свойства аэрозолей и вводятся некоторые аспекты динамики аэрозолей. Также включены такие темы, как дистанционное зондирование аэрозолей со спутников, влияние аэрозолей на изменение климата и зарождение атмосферы. Так тоже несколько приложений, связанных со здоровьем *implica-* ных аэрозолей и, следовательно, к тем, касающихся воздействия на человеческий организм и инфекционный контроль. Количественная оценка воздействия аэрозолей на здоровье играет решающую роль в защите окружающей среды. Сегодня фармацевтическая промышленность испытывает растущее давление, требующее полной реализации потенциала легких для местного и систематического лечения заболеваний. Результатом этого стали новые устройства для подачи аэрозоля, способные производить частицы с определенными характеристиками для улучшенной доставки. Синтез наноструктурированных материалов, безопасность новых наноматериалов и фильтрация являются важными инженерными темами в аэрозольной науке.

В книге также уделяется значительное внимание специфическим источникам аэрозоля, таким как выбросы транспортных средств и биоаэрозоли. В нем обсуждается важность радиоактивных аэрозолей как индикаторов атмосферных процессов после аварии на АЭС "Фукусима". Определение значимости конкретных источников аэрозоля важно для оценки воздействия на человека и было определено как область со значительными пробелами в знаниях. 20 Марта 2013 Михалис Лазаридис и Иэн Колбек

1

Введение

Михалис Лазаридис¹ и Ян Колбек²

¹ Факультет инженерной защиты окружающей среды, Критский технический университет, Греция

² Школа биологических наук, Эссекский университет, Великобритания

1.1 Введение

Аэрозоль определяется как суспензия жидкости или твердого вещества в газе. Аэрозоли часто называют либо "желательными", либо "нежелательными". К первым относятся те, которые специально созданы для медицинских целей, и те, которые намеренно созданы из-за их полезных свойств (например, нанотехнологии, керамические порошки); последние часто связаны с потенциальным вредным воздействием на здоровье человека (например, загрязнение окружающей среды). Веками люди думали, что существуют только вредные аэрозоли. Ранние авторы указывали на общую связь между заболеваниями легких и вдыханием аэрозолей. В 1700 году итальянский врач Бернардо Рамаццини описал воздействие пыли на органы дыхания, включая описания многочисленных случаев смертельных пылевых заболеваний (Франко и Franco, 2001).

Аэрозоли лежат в основе экологических проблем, таких как глобальное потепление, photochemических смога, стратосферного озона, истощение и плохое качество воздуха. Признание воздействия аэрозолей на климат можно проследить с 44 года до нашей эры, когда извержение вулкана Этна было связано с прохладным летом и неурожаем. Люди знали о профессиональной опасности для здоровья, связанной с воздействием аэрозолей, на протяжении многих веков. Лишь относительно недавно возросла осведомленность о возможных последствиях загрязнения окружающей среды транспортными средствами, и в частности субмикронными частицами, для здоровья людей.

О существовании частиц в атмосфере упоминается в самой ранней литературе (см. Husar, 2000; Calvo *et al.*, 2012). В 1800-х годах геологи изучали атмосферную пыль в связи с почвообразованием, а позже метеорологи того же века признали эту способность

влияние атмосферных частиц на образование дождя, а также их влияние как на видимое, так и на тепловое излучение (Husar, 2000).

Также широко обсуждалось воздействие переноса атмосферных частиц на большие расстояния на окружающую среду (Stohl and Akimoto, 2004). Около 1600 года сэр Фрэнсис Бэкон сообщил, что газогенераторы южной Франции подали жалобу королю Англии, утверждая, что дым от сжигания морских водорослей повлиял на цветки винограда и погубил урожай. В восемнадцатом веке лесные пожары в России и Финляндии привели к региональной дымке над Центральной Европой. Уже тогда Варгентин (1767) и Гадолин (1767) (цитируется в Husar, 2000) указали, что можно было бы нанести на карту путь дыма на основе местоположений пожаров и его появления в разных местах. Данкельман (1884) упоминает, что дымка от пожаров в африканской саванне наблюдалась в различных регионах Европы со времен Римской Империи.

На возможность образования атмосферных частиц в результате газообразных химических реакций указал Рафинеск (1819). В своей статье, озаглавленной "Размышления об атмосферной пыли", он делает ряд уместных наблюдений: *'Всякий раз, когда солнце светит в темной комнате, его лучи дисплеи толпа осознанных пыльной молекул различной формы, которые были до Инвис-ible как воздух, в котором они плавают, но тем не менее действительно существует. Они образуют атмосферную пыль, существующую повсюду в нижних слоях нашей атмосферы. Размер частиц очень неодинаков, а их форма непохожа'*.

Несмотря на широкое распространение аэрозолей в природе и их повседневное создание во многих сферах человеческой деятельности, только сравнительно недавно было проведено научное изучение их свойств и поведения. В конце девятнадцатого и начале двадцатого веков многие ученые, работающие в различных областях, заинтересовались проблемами, которые теперь будут считаться связанными с аэрозолями. Результаты довольно часто были либо побочными продуктами фундаментальных исследований, связанных с другими областями, либо просто наблюдениями, вызвавшими любопытство. Несколько великих физиков-классиков и математиков были привлечены особыми свойствами облаков твердых частиц и предприняли исследования по различным аспектам аэрозольной науки, которые с тех пор стали ассоциироваться с их именами, например, Стокса, Эйткена и Рэлея.

Каким бы ни было применение, основные правила, регулирующие поведение аэрозолей, остаются неизменными. Правильно это или нет, но термины "аэрозоли" и "частицы" часто свободно взаимозаменяются в литературе. Размер аэрозолей варьируется от 0,001 мкм (0,001 мкм = $10^{-9} \text{ m} = 1 \text{ nm} = 10 \text{ \AA}$) до 100 мкм (10^{-4}

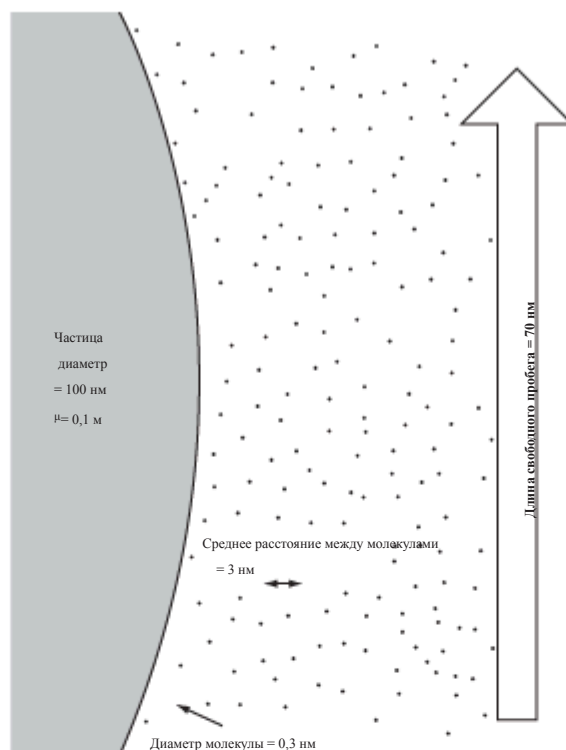
m), поэтому размеры частиц варьируются на несколько

порядков величины, от почти макроскопических до почти молекулярных размеров. Все свойства аэрозоля зависят от размера частиц, некоторые очень сильно. Самые маленькие аэрозоли приближаются по размеру к крупным молекулам газа и обладают многими из тех же свойств; самые крупные - это видимые частицы, обладающие свойствами, описанными ньютоновской физикой.

На рисунке 1.1 показан относительный размер аэрозольной частицы (диаметр 0,1 мкм) по сравнению с молекулой (диаметр 0,3 нм, среднее расстояние между ними 3 нм, средняя длина свободного пробега 70 нм (определяется как среднее расстояние, пройденное молекулой между последовательными столкновениями)).

Существуют различные типы аэрозолей, которые классифицируются по физической форме и способу образования. Обычно используются

термины "пыль", "дым", "дымка", "туман" и "туман". Практически все основные тексты по аэрозолям содержат определения различных категорий. Например, (1932):



Относительный размер аэрозольной частицы (диаметр 0,1 мкм) по сравнению с молекулой Рисунок 1.1 (диаметр 0,3 нм).

Пыль: 'Пыль образуется в результате естественных и механических процессов дезинтеграции и диспергирования.'

Дым: 'Если взвешенный материал образуется в результате горения или деструктивной дистилляции, его обычно называют дымом.'

в то время как совсем недавно, для Кулкарни, Барона и Виллеке (2011):

Пыль: 'Твердые частицы, образующиеся в результате дробления или другого механического воздействия, приводящего к физическому распаду исходного материала. Эти частицы имеют неправильную форму и крупнее около 0,5 мкм.'

Дым: 'Твердый или жидкий аэрозоль, образующийся в результате неполного сгорания или конденсации перенасыщенного пара. Размер большинства частиц дыма составляет субмикрон.'

Из ранней литературы ясно, что пыль и дым определяются не с точки зрения размера частиц, а с точки зрения механизма их образования.

Фактические значения слов "дым" и "пыль" недавно стали предметом апелляции в Апелляционном суде Нового Южного Уэльса (East West Airlines Ltd против Тернера, 2010). Трибунал по пылевым болезням Нового Южного Уэльса ранее вынес решение в пользу бортпроводника, который надыхался дымом в самолете. Судья первой инстанции пришел к выводу, что 'Говоря обычным языком, пыль включает в себя дым или пепел. Пыль, возможно, необходимо отличать от газа, дыма или испарений. Различие заключается в том, что пыль состоит из твердых частиц.

Дым содержит твердые частицы и, соответственно, его удобнее описывать как пыль, а не как газ, дым или пар. Я не считаю, что существует различие между дымом и пылью, так что дым не может быть пылью. Когда твердые частицы оседают, они для большинства людей воспринимаются как пыль. Если бы с помощью микроскопа или другого приспособления можно было увидеть твердые частицы без дымчатого налета, большинство людей распознали бы в них твердые частицы как пыль. Словарные определения включали бы дым как пыль'.

Апелляционный суд заявил:

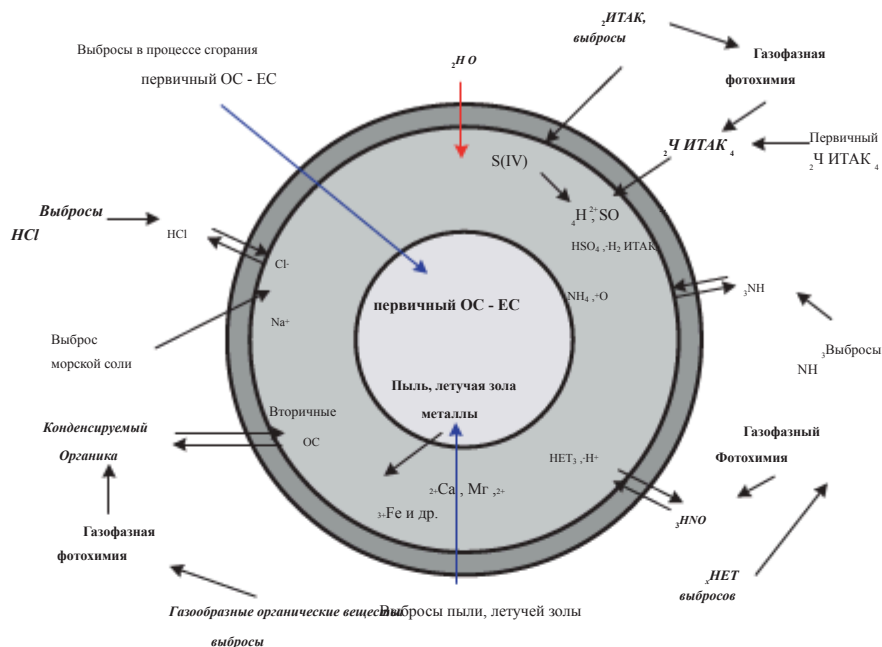
*Его честь не пришел к выводу, что в принципе "дым" является "пылью" ...
... Это было не решение с точки зрения права, а фактическое определение. У его
чести было достаточно доказательств, подтверждающих этот вывод.*

Правительства различных стран по всему миру разработали стандарты для защиты работников от токсичных веществ на рабочих местах. Например, Американская конференция государственных промышленных гигиенистов (ACGIH) публикует список из более чем 600 химических веществ, для которых установлены "пороговые значения". Примерно 300 из них находятся на рабочих местах в форме аэрозолей. Таким образом, наука об аэрозолях занимает центральное место в изучении, характеристике и мониторинге атмосферной среды. Аэрозоли могут вызывать проблемы со здоровьем при попадании на кожу, но, как правило, наиболее чувствительный путь проникновения в организм - через дыхательную систему. Знание осаждения твердых частиц в дыхательной системе человека важно для оценки дозы и анализа риска загрязняющих веществ, находящихся в воздухе. Процесс осаждения контролируется физическими характеристиками вдыхаемых частиц и физиологическими факторами участвующих в нем людей. Из физических факторов размер частиц и распределение по размерам являются одними из наиболее важных. Те же физические свойства, которые определяют содержание аэрозолей в атмосфере, действуют и в легких.

Аэрозоли в атмосфере бывают первичными или вторичными по своей природе. Первичные аэрозоли представляют собой атмосферные частицы, которые выбрасываются или выпрыскиваются непосредственно в атмосферу, тогда как вторичные аэрозоли представляют собой атмосферные частицы, образующиеся в результате *in situ* агрегация или образование зародышей из молекул газовой фазы (превращение газа в частицу). Частицы в атмосфере состоят из смеси твердых частиц, капель жидкости и жидких компонентов, содержащихся в твердых частицах. Частицы изменчивы в зависимости от их концентрации и физико-химических и морфологических характеристик. Частицами могут быть продукты сгорания, взвеси почвенных материалов, взвеси морских брызг или вторичные образования в результате химических реакций в атмосфере (рис. 1.2).

Аэрозоли оказывают разнообразное воздействие, начиная от воздействия на здоровье человека и заканчивая воздействием на видимость и климат. Они также очень важны для общественного здравоохранения, и понимание их динамики имеет важное значение для количественной оценки их воздействия. Воздействие аэрозолей на человека происходит как на открытом воздухе, так и в помещении. Они также важны во многих технологических приложениях, таких как доставка лекарств в легкие, доставка топлива для сжигания и производство наноматериалов.

Проект Всемирной организации здравоохранения "Глобальное бремя болезней" (Global Burden of Disease) ВОЗ по борьбе с ГББ показал, что ежегодно 3,2 миллиона человек преждевременно умирают от рака, болезней сердца и других заболеваний, связанных с загрязнением воздуха твердыми частицами; 65% этих смертей происходят в Азии. Brauer *et al.* (2012) сообщили, что 99% населения Южной и Восточной Азии проживает в районах, где соблюдаются Руководящие принципы ВОЗ по качеству воздуха (среднегодовое значение



Схематическое изображение химических реакций и процессов, связанных с Рис.

1.2 химический состав твердых частиц.

10 мкг/м³) для РМ_{2.5} превышен. Загрязнение твердыми частицами также заняло девятое место среди всех факторы риска с точки зрения потерянных лет из-за инвалидности по Брауэру (2012) *et al*

Аэрозоли потенциально способны изменить глобальный радиационный баланс. Согласно отчету за 2007 год, подготовленному Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК), воздействие аэрозолей на климат с начала индустриальной эры составило около 20% от воздействия парниковых газов. Считается, что аэрозоли ответственны за негативное воздействие и, следовательно, частично смягчили ожидаемое глобальное потепление в течение этого периода (Кулмала, Риппинен и Керминен, 2012).

1.2 Размер и форма

Размер частиц является наиболее важным показателем для прогнозирования поведения аэрозоля. Когда все его частицы одинакового размера, аэрозоль называется "монодисперсным". Это чрезвычайно редко встречается в природе. Как правило, частицы различаются по размеру, и это называется "полидисперсностью". Когда его частицы химически идентичны, аэрозоль называется "гомогенным". Формы частиц можно разделить на три основных класса:

- **Изометрические:** Три размера частиц примерно равны, например сферические частицы.
- **Тромбоциты:** Частица имеет два длинных размера и третий маленький, например листья и диски.
- **Волокна:** Частица имеет один длинный размер и два гораздо меньших, например иглы и асбест.

Большая часть наших знаний о поведении аэрозоля относится к изометрическим частицам. Обеспокоенность по поводу опасности волокон для здоровья побудила их провести исследование.

Когда частицы имеют сферическую форму, для описания их размера можно использовать их радиус или диаметр. Однако, поскольку большинство частиц не сферические, необходимо использовать другие параметры. Часто диаметр определяется в терминах скорости схватывания частиц. Все частицы с одинаковыми скоростями осаждения считаются одинакового размера, независимо от их фактического размера, состава или формы. Два наиболее распространенных определения:

• **Аэродинамический диаметр** (см. Главу 2): Диаметр сферы единичной плотности с

теми же аэродинамическими свойствами, что и у рассматриваемой частицы. Это означает, что частицы любой формы или плотности будут иметь одинаковый аэродинамический диаметр, если их скорость оседания одинакова. •

Диаметр Стокса: Диаметр сферы той же плотности, что и рассматриваемая частица

которая имеет ту же скорость оседания, что и эта частица.

Стоксов диаметр и аэродинамический диаметр отличаются только тем, что Стоксов диаметр включает в себя плотность частиц, тогда как аэродинамический диаметр - нет. Также обычно используется эквивалентный диаметр. Когда размер частиц измеряется с помощью определенной методики, измерение обычно соответствует определенному физическому свойству; если используется электрически индуцированное движение, то сообщается диаметр, эквивалентный подвижности.

1.3 Распределение по размерам

Определение распределения аэрозоля по размерам является одним из наиболее важных аспектов в измерении и моделировании динамики аэрозоля. Диаметр окружающей частицы может определяться различными способами, включая измерения рассеяния света, характеристику аэродинамического сопротивления частицы и измерение ее электрической подвижности или скорости осаждения. Необходимо ссылаться на эквивалентный диаметр независимо от метода измерения, и поэтому были введены стоксовский и аэродинамический эквивалентные диаметры. Аэродинамический диаметр определяется как диаметр сферической частицы с такой же скоростью оседания, что и рассматриваемая частица, но с плотностью материала 1 г/см^3 (Хиндс, 1999).

Частицы могут быть классифицированы по их размеру на основе (i) их наблюдаемого модального распределения (Hinds, 1999), (ii) 50%-ного предельного диаметра или (iii) дозиметрических переменных, связанных с воздействием на человека. В последнем случае наиболее распространенными подразделениями являются $\text{PM}_{2.5}$

и PM_{10} .

Премьер - министр₁₀

определяется как взвешенные в воздухе твердые частицы, проходящие через входное отверстие для отбора проб с 50%-ным ограничением эффективности при аэродинамическом диаметре

10 мкм, которое пропускает частицы меньше этого размера (Европейская комиссия, 2008); $\text{PM}_{2.5}$

размер связан с возможностью использования $\text{PM}_{2.5}$ частицы, проникающие в нижние отделы

дыхательных путей человека. В модальном распределении можно наблюдать несколько подкатегорий: режим зарождения, режим Айткена, режим накопления, ультрадисперсные частицы, а также мелкие и крупнозернистые частицы. Эти термины обсуждаются в главе 2.

Важной областью распределения по размерам является ультратонкая часть режима ядер. Понимание физики и химии очень маленьких кластеров, содержащих несколько сотен молекул, представляет собой теоретическую и экспериментальную задачу. На рисунке 1.3 показаны некоторые типичные диапазоны размеров аэрозолей и связанные с ними свойства.

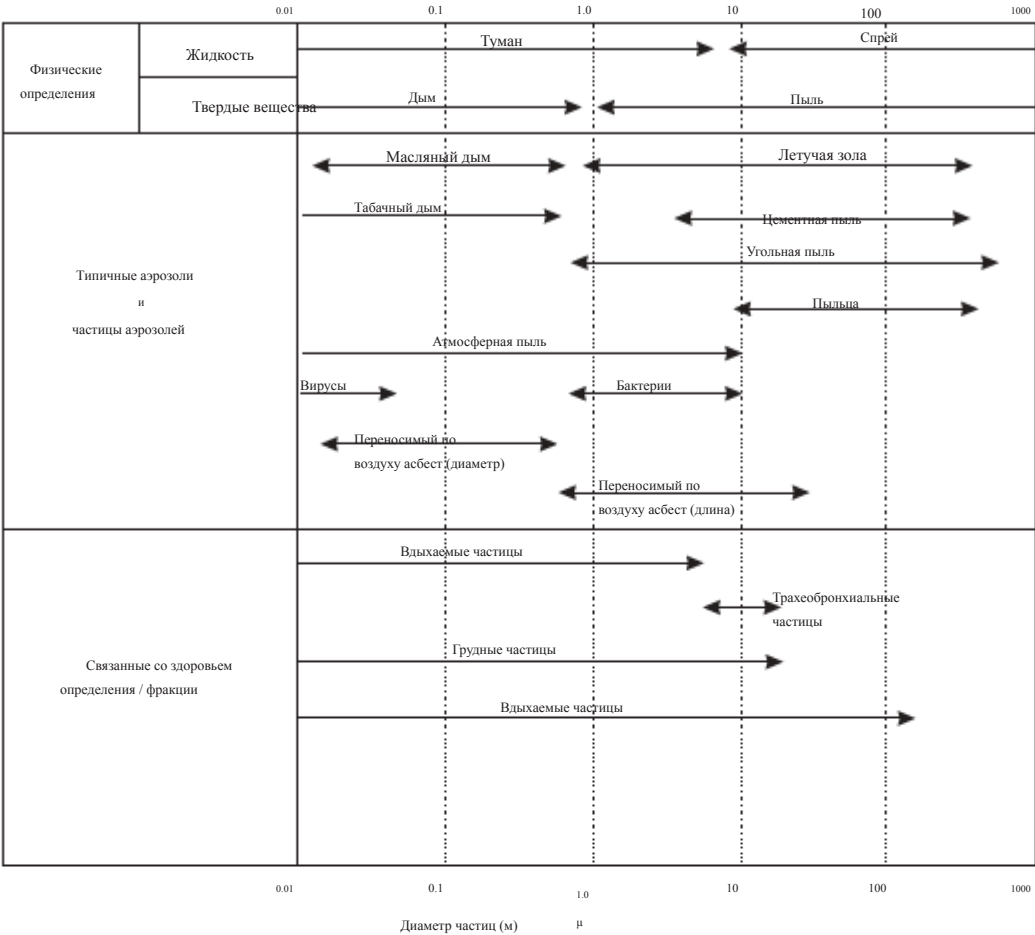


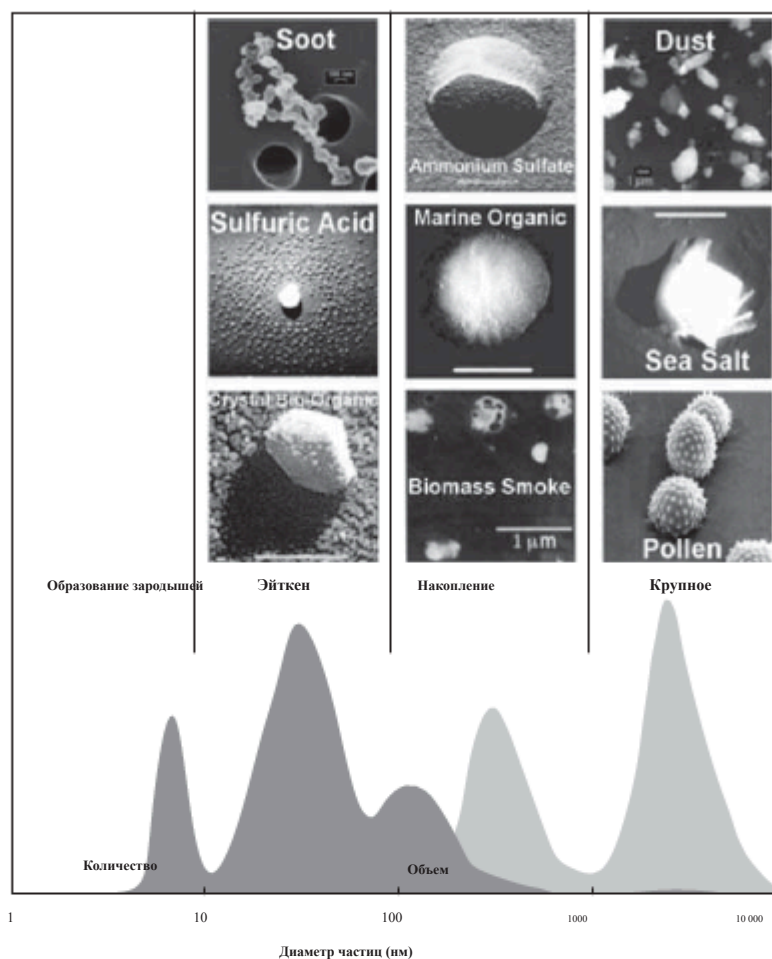
Рисунок 1.3 Диапазон размеров частиц аэрозолей.

Различные режимы аэрозоля связаны с различными источниками и механизмами образования, а также с различными химическими характеристиками, как показано на рисунке 1.1 для количественного и объемного распределения. Примеры аэрозолей в режиме Айткена включают сажу, сернистую кислоту и кристаллические биоорганические частицы; в режиме накопления - сульфат аммония, морскую органику и дым от биомассы; а в режиме грубого помола - пыль, морскую соль и пыльцу.

На рисунке 1.4 показан пример распределения аэрозоля по размерам и морфологии, полученные с помощью электронной микроскопии. Показано распределение количества и объемного размера вместе с химическим составом по размерам для ряда типов аэрозолей.

Для описания динамики аэрозоля используется логарифмическое каноническое распределение массы частиц. Мультиномальная модель широко используется для описания распределения аэрозолей по размерам (Сайнфельд и Пандис, 2006; Лазаридис, 2011). Мультиномальное распределение математически выражается как:

$$\frac{dN}{d(\text{журнал}(D_p))} = \sum_{n=1}^N \frac{N}{2 \pi \log(\sigma)} \cdot \left[\frac{\text{журнал } D_p - \text{журнал регистрации}(D_{\text{страница}})}{2 \text{ журнал}^2(\sigma)} \right]$$



Распределение аэрозоля по размерам и морфология для различных типов аэрозолей. Воспроизведено Рисунок 1.4 с разрешения Хайнценберга et al. (2003). Авторское право © 2003, Springer Science + Бизнес-сми.

где n это количество режимов, N_s концентрация количества в каждом режиме, μ аэрозоль

диаметр, $D_{pg,i}$ средний геометрический диаметр в каждом режиме и $\sigma_{g,i}$ геометрический стандарт отклонение.

Поведение аэрозоля в атмосфере контролируется внутренними и внешними процессами. Внутренние процессы действуют в пределах границ системы, в то время как внешние процессы действуют через границы (Уитби и Макмарри, 1997). Внутренние процессы включают коагуляцию, конденсацию, механизмы испарения, адсорбции/десорбции, гетерогенной химии и образования зародышей (рис. 1.5). Внешние процессы включают конвекцию, диффузию и действие внешних сил, таких как термофорез (Хиндс, 1999).

На рис. 1.6 представлены некоторые типичные распределения атмосферного аэрозоля по количеству и объему. ите. Распределение по объему отличается от распределения по количеству; обычно оно бимодальное, с минимальной величиной ~ 1 мкм (предел разделения между крупными и мелкодисперсными частицами). Арифметическое распределение имеет максимум в сверхтонком режиме (режим зарождения), тогда как

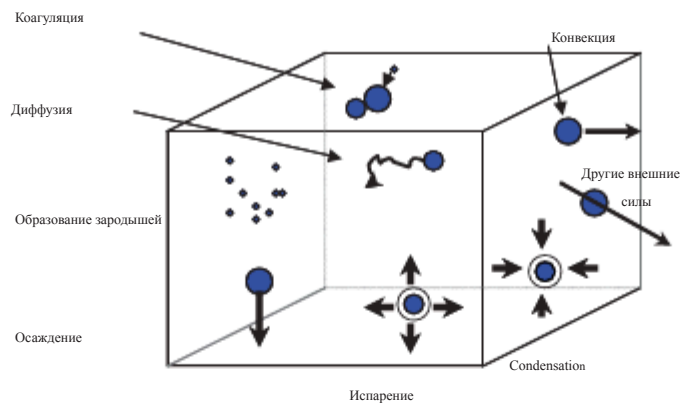
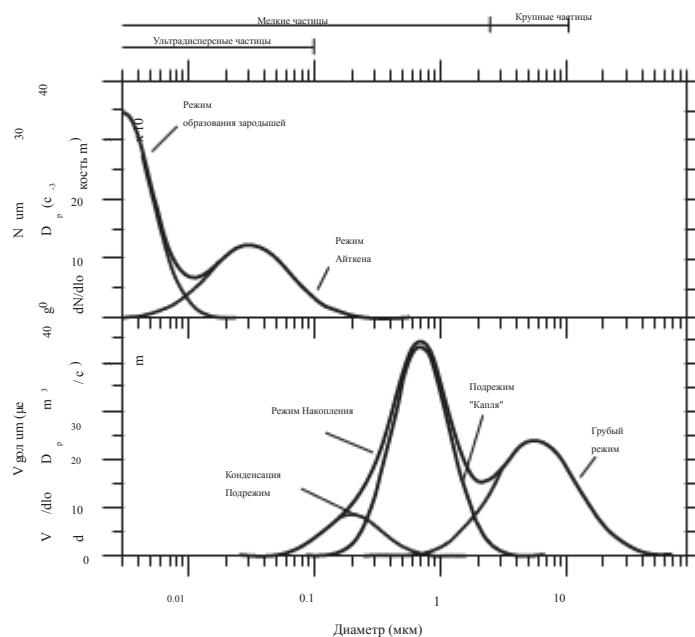


Рисунок 1.5 Внутренние и внешние процессы, управляющие поведением аэрозоля.



Типичное распределение аэрозоля в окружающей среде по количеству и объему. (Адаптировано по Seinfeld и Pandis, 2006.)

распределение по объему представляет собой два логарифмических распределения, одно для режима накопления и одно для грубого режима. Следует помнить, что 1 миллион частиц размером 1 мкм имеет тот же объем, что и одна частица размером 100 мкм.

Разделение мелких и крупнозернистых частиц является определяющим фактором, поскольку частицы в этих двух регионах различаются по своему источнику, химическому составу, процессам удаления из атмосферы, оптическим свойствам и воздействию на здоровье человека (Хиндс, 1999; Лазаридис, 2011).

1.4 Химический состав

Состав атмосферного аэрозоля определяется по его источнику, который может включать выбросы первичных и вторичных частиц, образующихся в атмосфере. Основные компоненты аэрозоля включают сульфат, нитрат, аммоний, хлорид, элементарный углерод, органический углерод, воду, хлорид и материал земной коры (Сайнфельд и Пандис, 2006).

Материал земной коры, биогенные вещества и морская соль составляют большинство природных аэрозолей. Антропогенные аэрозоли включают первично выбрасываемую сажу (элементарный углерод) и вторично образующийся углеродистый материал (органический углерод) и неорганические вещества (нитраты, сульфаты, аммоний и вода).

На рисунке 1.7 показано распределение частиц и физико-химические процессы, связанные с различными размерами частиц.

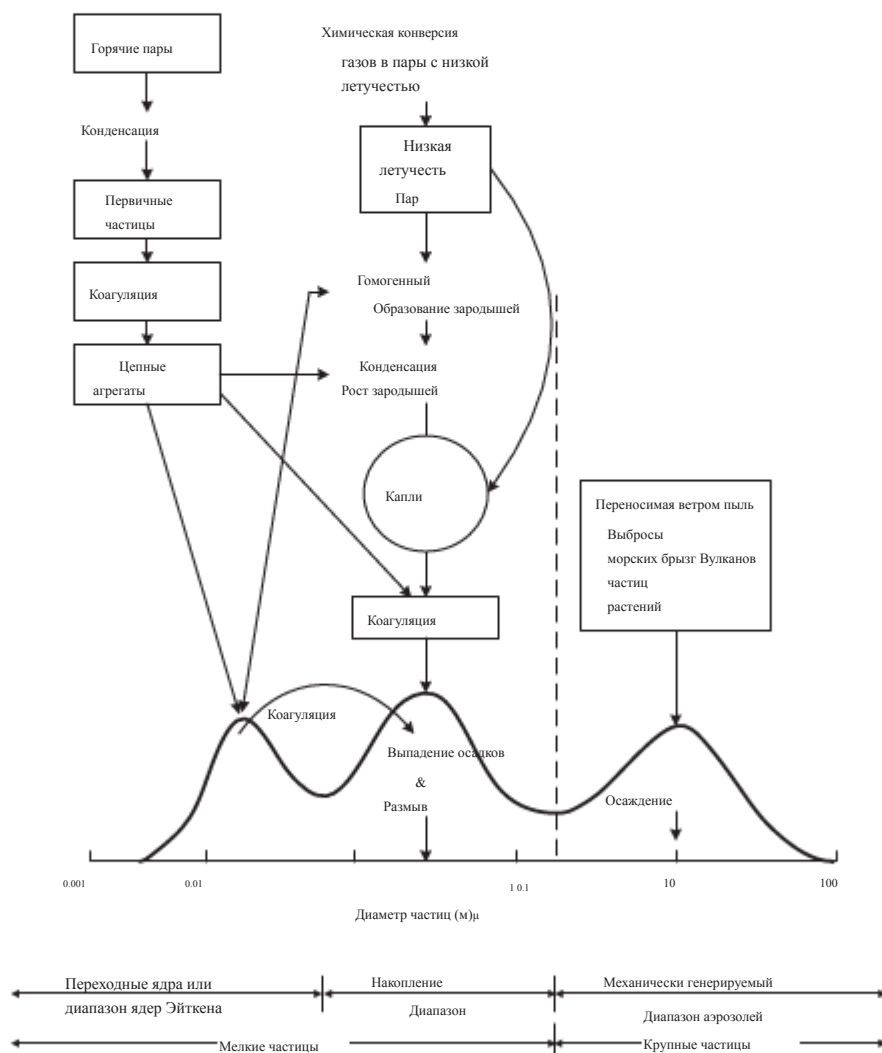


Рисунок 1.7

Физико-химические процессы, связанные с размером частиц аэрозоля.

Важная часть вторичных аэрозольных частиц в атмосфере состоит из вторично образовавшегося органического вещества (Терпин и Хантзикер, 1991), образующегося в результате окисления органических соединений. Распределение органических соединений в виде газовых частиц в атмосфере важно для определения их связи с мелкодисперсными частицами (Сайнфельд и Пандис, 2006; Лазаридис, 2011). Количество различных химических форм органического вещества и отсутствие прямого химического анализа означают, что фракционные выходы аэрозоля, фракционные аэрозольные коэффициенты и методологии адсорбции/абсорбции для описания состава органического вещества в аэрозольной фазе определяются в основном экспериментально. Важным путем образования вторичных органических частиц являются биогенные углеводороды. Во всем мире выбрасывается очень большое количество биогенных углеводородов, которые обладают высокой реакционной способностью (Хоффманн *et al.*, 1997).

Биаэрозоли включают все находящиеся в воздухе частицы биологического происхождения, то есть бактерии, грибы, грибковые споры, вирусы и пыльцу, а также их фрагменты, включая различные антигены. Аэродинамические диаметры могут варьироваться примерно от 0,5 до 100 мкм (Невалайнен *et al.*, 1991; Кокс и Уэйтс, 1995). Переносимые по воздуху микроорганизмы со временем становятся нежизнеспособными и фрагментируются из-за высыхания. Воздух в помещении содержит сложную смесь (i) биаэрозолей, таких как грибки, бактерии и аллергены, и (ii) небиологических частиц, таких как пыль, табачный дым, частицы, образующиеся при приготовлении пищи, выхлопные газы автомобилей и частицы тепловых электростанций. Воздействие некоторых из этих биологических объектов, а также фрагментов микроорганизмов, таких как фрагменты клеточной стенки и жгутики, и микробных метаболитов, таких как эндотоксин, микотоксинов и летучих органических соединений (ЛОС), может привести к неблагоприятным последствиям для здоровья. В частности, увеличение приступов астмы и гиперреактивности бронхов было коррелировано с повышением уровня биаэрозоля. Эта проблема обычно измеряется в стандартных колониях форма-ских единиц в единице объема (кое/куб. метр на счету). Подробное рассмотрение биаэрозолей можно найти в главе 16 и в недавнем обзоре Депре *et al.* (2012).

1.5 Измерения и отбор проб

Согласно Керкеру (1997), первое зарегистрированное использование аэрозолей, полученных в лабораторных условиях, было Леонардо да Винчи (1452-1519), который хотел объяснить голубой цвет неба. Столетия спустя Тиндалл (1869) отметил, что если луч света пропустить через суспензию и рассматривать под углом на темном фоне, то присутствие частиц обнаруживается по рассеянному свету.... пенсия. Наследие Тиндалла в области аэрозольной науки было велико (Джентри и Лин, 1996), включая, в частности, его предположение о связи между светом, рассеянным аэрозолем на ранних стадиях его образования, когда частицы были небольшими, и цветом неба и поляризацией света. Тиндаль предположил, что все мелкие частицы ведут себя подобным образом, и рассматривал небесный свет как специфический пример общего физического явления. Эта работа и теоретическая обработка Рэлея (1871) дали готовое объяснение рассеянию синего света очень маленькими частицами и преимущественному пропусканию красного света, столь поразительным примером чего являются яркие цвета заката. Сначала Рэлей полагал, что голубое небо вызвано присутствием мелких частиц, подобных тем, с которыми экспериментировал Тиндаль, но некоторое время спустя он пересмотрел это представление, отметив, что в частицах как таковых нет необходимости и что голубое небо 'может быть объяснено дифракцией от самих молекул воздуха'.

В прошлом для образования аэрозолей использовались взрывающиеся провода. Хотя научный интерес к этому явлению по-настоящему возник только в 1920-х годах, первая статья о взрывающихся проводах была прочитана Нэрном (1774) перед Королевским обществом в декабре 1773 года. Он использовал взрывающийся провод, чтобы доказать, что ток во всех частях последовательной цепи одинаков. Примерно 40 лет спустя Сингер (1815) и Сингер и Кросс (1815) сообщили о новых экспериментах, связанных со взрывающимися проводами. Фарадей (1857) продемонстрировал, как взрывающиеся провода можно использовать для изготовления металлической пленки или зеркала. Он был первым ученым, систематически использовавшим метод взрывающейся проволоки для образования аэрозолей. Он также был первым, кто охарактеризовал аэрозоли и разработал методы, которые позволили исследовать некоторые из их оптических свойств (Джентри, 1995).

Потребность в измерении содержания аэрозолей в ряде областей резко возросла за последние два десятилетия. В результате в настоящее время на рынке представлено большое количество приборов, начиная от небольших портативных устройств для мониторинга воздействия на персонал и заканчивая исследовательскими лабораторными приборами. Выбор инструмента зависит от целей вашего исследования и от определения соответствия стандартам, количественной оценки тенденций и определения горячих точек. Другими словами, вы должны решить, (i) что вы хотите измерить (какие показатели: количество, массу, объем и распределение по размерам или концентрацию), (ii) является ли время отклика измерения критичным, (iii) как долго вы будете отбирать образцы и (iv) нужно ли вам забирать образец.

Любая проба должна соответствовать окружающей среде с учетом времени, местоположения и распределения частиц по размерам. Как будет обсуждаться в главе 3, система отбора проб может влиять на передаваемую пробу. Частицы ведут себя иначе, чем молекулы газа, когда они рассеяны в воздухе. Они осаждаются под действием силы тяжести, воздействуют на изгибы из-за инерции частиц, осаждаются на внутренних поверхностях в результате молекулярной и турбулентной диффузии и подвергаются воздействию тепловых, электростатических и акустических сил.

Как правило, устройства для отбора проб твердых частиц делятся на два типа: те, которые собирают образец на подложке, и те, которые проводят *in situ* измерения в режиме реального времени. В первом случае наиболее важно обеспечить совместимость субстрата с последующим анализом: для гравиметрического анализа субстрат должен быть стабильным по весу; для микроскопии фильтр должен быть прозрачным для излучения (оптического или электронного); для биологического аэрозоля должно быть возможным извлечение организмов из фильтра; а для химического анализа субстраты должны иметь низкие уровни анализируемого соединения или быть пригодными для сжигания. В последнем случае могут быть использованы методы экстрактивного или внешнего зондирования. Экстрактивные методы требуют, чтобы аэрозоль вводился в прибор (например, оптические счетчики частиц), в то время как методы внешнего зондирования неинвазивны.

Таким образом, существует широкий спектр методов и инструментов для измерения и характеристики аэрозолей. У каждого из них есть преимущества и недостатки с точки зрения размера, диапазона, концентрации, разрешения измерений, скорости отклика и так далее. Постоянно разрабатываются новые приборы.

Список литературы

- Brauer, M., Amann, M., Burnett, R.T. *et al.* (2012) Оценка воздействия для оценки глобального бремени болезней, обусловленных загрязнением наружного воздуха. *Наука об окружающей среде и технологии*, 45, 652–660.

Кальво, А.И., Алвес, К., Кастро, А. *et al.* (2012) Исследование источников аэрозоля и химического состава

состав: прошлые, текущие и возникающие проблемы. *Атмосферные исследования*, 120-121, 1 - 28. Кокс, С. С. и часам, С. М. (1995) эта проблема в среде, в *Проблема Силы-*

забронировать (ред. К.С. Кокс и К.М. Уэйтс), издательство Льюиса, Бока-Ратон, Флорида, стр. 11-14.

Данкельман, Против (1884) "Беволькунгсверхэлтнисс в суде над Африканцами". *Meteo-*

rologische Zeitschrift, 8, 301 - 311.

Депре, В.Р., Хаффман, Дж.А., Берроуз, С.М. *et al.* (2012) Первичный биологический аэрозоль

частицы в атмосфере: обзор. *Серия B Tellus*, 64, 15598. doi: 10.3402/тел.-

lusb.v64i0.15598

East West Airlines Ltd против Тернера (2010). NSWCA 53; BC201001873 - 01 апреля

2010 - Верховный суд Нового Южного Уэльса, Апелляционный суд.

Директива 2008/50/ЕС Европейской комиссии Европейского парламента и

Совет от 21 мая 2008 года о качестве окружающего воздуха и более чистом воздухе в Европе. *Официальный журнал Европейского Союза*, L 152, 1-44.

Фарадей, М. (1857) Экспериментальные отношения золота (и других металлов) к свету. *Philosophi-*

труды Лондонского королевского общества, 147, 145- 181.

Франко Г. и Франко Ф. (2001) Бернардино Рамазини: отец медицины труда

Американский журнал общественного здравоохранения.

Гадолин, Дж. (1767). Bedenken von Sonnenrauch. Abhandlung Der Königlichen Schwedis-

chen Akademie der Wissenschaften, Abhandlungen für die

Monate April, Mai, Juni, 1767. Gentry, J.W. (1995) The aerosol science

contributions of Michael Faraday. *Журнал по аэрозолям*

Наука об аэрозолях, 341-349. 26

Джентри, Дж.У. и Лин, Дж.К. (1996) Наследие Джона Тиндалла в науке об аэрозолях. *Журнал*

из области аэрозольной науки, S503 - S504.

Heintzenberg, J., Raes, F., Schwartz, S. *et al.* (2003) Тропосферные аэрозоли, в книге *Химия атмосферы*

в меняющемся мире (ред. Г. Брассер, Р. Принн и А.П. Пшенин), Спрингер,

Берлин, Гейдельберг, стр. 125 - 156. Хиндс, У.К. (1999)

Аэрозольная технология: свойства, поведение и измерение содержания частиц, переносимых воздухом-

частицы несут, 2-е изд., John Wiley & Sons, Inc., Нью-Йорк.

Хоффманн Т., Одум Дж.Р., Боумен Ф. *et al.* (1997) Образование органических аэрозолей из

окисление биогенных углеводов. *Журнал химии атмосферы*,

26, 189-222.

Гусар Р.Б. (2000). Наука об атмосферных аэрозолях до 1900 года, в разделе *История науки об аэрозолях-*

ence, (eds Preining, O. and Davis E.J.), Verlag der Oesterreichischen

Akademie der Wissenschaften, Wien, pp. 25 - 36. Kerker, M.

(1997) Light scattering instrumentation for aerosol studies: an historical

Обзор. *Наука и технология в области аэрозолей*, 27, 522-540.

Кулкарни П., Барон П.А. и Виллеке К. (2011) *Измерение аэрозоля: принципы, технологи-*

способы применения, 3-е изд., John Wiley & Sons, Inc., Хобокен, Нью-Джерси.

Кулмала М., Рийпинен И. и Керминен В.М. (2012) Аэрозоли и изменение климата, в книге

От ядра Земли до космического пространства, (ред. Хаапала И.),

Спрингер, Берлин, Гейдельберг, стр. 219-226. Лазаридис, М. (2011)

Первые принципы метеорологии и загрязнения воздуха, Спрингер

Наука + деловые СМИ, Дордрехт.

Нэрн Э. (1774) Электрические эксперименты. *Философские труды Королевского общества*

Лондон, 64, 79 -89.

Nevalainen, A., Pasanen, A.L., Niinen, M. *et al.* (1991) Качество воздуха в помещениях на финском языке дома с проблемами плесени. *Environment International*, **17**, 299 - 302.

Рафинеск, К. (1819) Размышления об атмосферной пыли. *Американский научный журнал*, **1**, 397 - 400.

Рэлей, Л. (1871) О рассеянии света малыми частицами. *Философский журнал*, **41**, 446- 454.

Сингер, Г.Дж. (1815) Некоторый отчет об электрических экспериментах М. Де Нелиса из Малинса в Нидерландах. *Философский журнал*, **46**, 259- 264.

Сайнфельд, Дж.Х. и Пандис, С.Н. (2006) *Химия и физика атмосферы: от загрязнения воздуха-от загрязнения до изменения климата*, 2-е изд., John Wiley & Sons, Inc., Нью-Йорк.

Сингер, Дж.Дж. и Кросс, А. (1815) Отчет о некоторых электрических экспериментах М. Де Нелиса, о малинах в Нидерландах: с их расширением. *Философский журнал*, **46**, 161 - 166.

Стол, А. и Акимото,

Х. (2004) *Межконтинентальный перенос загрязнения воздуха*, Springer, Berlin.

Терпин, Б.Дж. и Хантзикер, Дж.Дж. (1991) Вторичное образование органического аэрозоля в Лос-Анджелесе

Бассейн Анджелеса: описательный анализ концентраций органического и элементарного

углерода. *Атмосферная среда. Часть А. Общие темы*, **25**, 207 - 215. Тиндалл, Дж. (1869) О голубом

цвете неба, поляризации светового потока в потолке и поляризации света облачным веществом в целом.-

излучение света облачным веществом в целом. *Труды Лондонского королевского общества*, **17**, 223- 233.

Варгентин, П. (1767). Anmerkungen ueber Sonnenrauch. Abhandlung Der Königlichen

Schwedischen Akademie der Wissenschaften, Abhandlungen für

die Monate April, Mai, Juni, 1767. Whitby, E.R. and McMurry,

Р.Н. (1997) Modal aerosol dynamics modeling. *Аэрозоль Sci-*

наука и технология,

27, 673 - 688.

Уайтлоу-Грей, Р. и Паттерсон, Х.С. (1932) *Дым: исследование дисперсных систем в воздухе*,

Эдвард Арнольд и компания, Лондон.

Динамика аэрозоля

Михалис Лазаридис¹ и Яннис Дроссинос²

¹ Факультет инженерной защиты окружающей среды, Критский технический университет, Греция

² Европейская Комиссия, Объединенный исследовательский центр, Италия

2.1 Введение

Взвешенные в воздухе твердые частицы (ТЧ) содержат различные химические компоненты и имеют размер от нескольких нанометров до нескольких сотен микрометров (Hinds, 1999). Очевидно, что ТЧ не является отдельным загрязняющим веществом, и его масса включает смесь многочисленных загрязняющих веществ, распределенных по-разному в разных размерах. Размер частиц является важным параметром, который определяет химический состав, оптические свойства, отложение частиц и вдыхание в дыхательных путях человека (РТ) (Хиндс, 1999; Фридлендер, 2000; Сайнфельд и Пандис, 2006; Лазаридис, 2011). Размер частиц определяется диаметром частиц, d , который чаще всего обычно выражается в микрометрах. Частицы представляют собой очень малую долю, менее 0,0001%, от общей массы или объема аэрозоля (Дроссинос и Хусиадас, 2006). Газовая фаза в основном влияет на поток частиц посредством гидродинамических сил.

Частицы могут быть разделены на несколько категорий; в зависимости от их размера они могут быть классифицированы в соответствии с (i) наблюдаемым модальным распределением, (ii) 50%-ным предельным диаметром измерительного прибора или (iii) дозиметрическими переменными, которые связаны с воздействием человека, несомненно, с атмосферными концентрациями. Однако эти категории не определены строго и обычно они зависят от конкретного приложения.

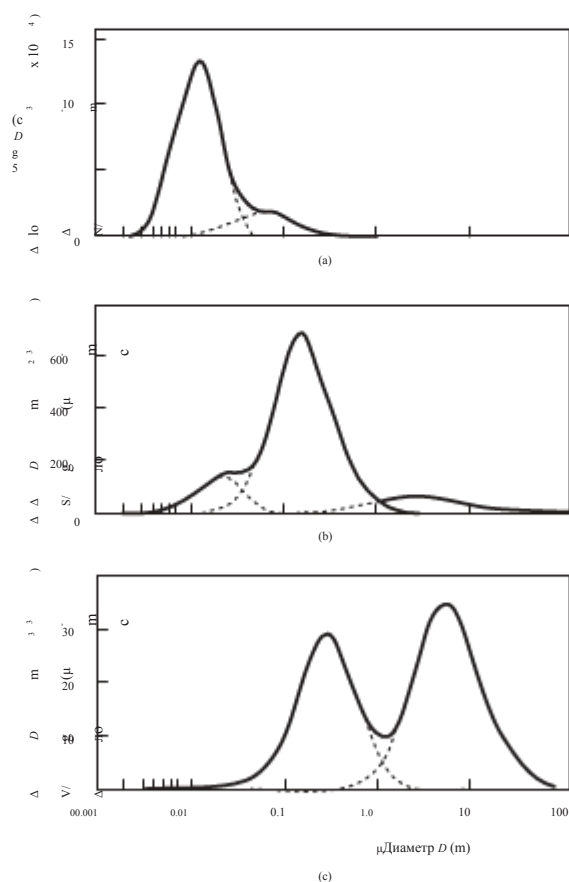
В категории (i) можно выделить несколько подкатегорий:

- **Режим образования зародышей:** Частицы диаметром $< 0,1$ мкм, которые образуются в результате процессов зародышеобразования. Нижний предел размера для этой категории не очень четко определен, но он близок к 3 нм.

- **Режим Айткена:** Частицы диаметром 0,01 мкм $< d_p < 100$ нм. Они происходят из образование зародышей пара или рост ранее существовавших частиц в результате конденсации.
- **Режим накопления:** Частицы диаметром 0,1 мкм $< d_p < \text{от } 1 \text{ до } 3 \text{ мкм}$. Верхний предел совпадает с относительным минимумом общего распределения частиц по объему. Частицы в этом режиме образуются либо в результате коагуляции более мелких частиц, либо в результате конденсации составляющих пара. Количество частиц в этой категории не увеличивается с ростом конденсации. Кроме того, механизмы удаления частиц в этой категории очень медленные, и в результате происходит их накопление.
- **Ультрасдисперсные частицы:** Частицы в режимах Эйткена и нуклеации.
- **Мелкая фракция:** $d_p < 2$ мкм.
- **Крупная фракция:** $d_p > 2$ мкм.

Частицы в атмосфере имеют распределение по размерам; для описания этих распределений обычно используются логарифмические распределения (Хиндс, 1999; Лазаридис, 2011). На рисунке 2.1 представлены типичные распределения атмосферного аэрозоля по количеству, площади поверхности и объему (для сферических частиц).

Логарифмическое нормальное распределение используется для представления распределения массы / количества / площади поверхности частиц (Hinds, 1999).



Типичное распределение аэрозоля в окружающей среде по (а) количеству (б) площади поверхности (с) объему. Рисунок 2.1 Воспроизведено с разрешения Колбека и Лазаридиса (2010). Авторское право © 2010, Springer Научные и деловые СМИ.

Частотная функция унимодального логарифмически нормального распределения может

быть выражена как: $\ln d - \ln d_g(1 - \alpha) = \frac{(\ln d - \ln d_g)^2}{2\sigma_{gF}^2}$ (2.1)

и что из бимодального в виде:

$$df(d) = \frac{\alpha}{2\sigma_{gF}} \exp\left[-\frac{(\ln d - \ln d_{gF})^2}{2\sigma_{gF}^2}\right] + (1-\alpha) \frac{1}{2\sigma_{gC}} \exp\left[-\frac{(\ln d - \ln d_{gC})^2}{2\sigma_{gC}^2}\right] \quad (2.2)$$

α представляет собой долю мелких частиц, $(1 - \alpha)$ - долю крупных частиц и d_g где средний геометрический диаметр. Коэффициенты F и C относятся соответственно к мелким и крупным частицам. Стандартное геометрическое отклонение распределения, данного:

$$\sigma_g = \frac{1}{N-1} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\ln d_i - \ln d_g)^2} \quad (2.3)$$

где N - общее количество частиц и d средний геометрический диаметр задается формулой:

$$\ln(d_g) = \frac{\sum_{i=1}^N \ln d_i}{N} \quad (2.4)$$

Существуют различные распределения, которые характеризуют конкретные свойства частиц, такие как их количество, площадь поверхности, объем и масса. Числовое распределение описывает количество частиц при различных размерах, тогда как массовое распределение описывает массу частиц при различных размерах частиц. Распределения, если их отнести к унимодальным логарифмически нормальным величинам, характеризуются средним геометрическим диаметром и стандартным геометрическим отклонением.

В этой главе представлен общий обзор динамики атмосферных аэрозолей, включая общее уравнение динамики аэрозолей (GDE), и соответствующих физических процессов, таких как агломерация, коагуляция, преобразование газа в частицы, осаждение и ресуспендирование.

2.2 Общее динамическое уравнение

Изменение распределения частиц по размерам в пространстве и времени описывается GDE, уравнением баланса численности. На распределение частиц по размерам в элементе фиксированного объема влияют процессы внутри объема (внутренние процессы) и процессы, которые переносят частицы через границы объема (внешние процессы) (Friedlander, 2000). Внутренние процессы включают коагуляцию, агломерацию, фрагментацию и превращение газа в частицы. Внешние процессы включают перенос через границы за счет потока газа, диффузию частиц, движение частиц, вызванное градиентами концентрации или температуры, и осаждение (Дроссинос и Хусиадас, 2006). GDE представляет собой нелинейное интегродифференциальное уравнение, подчиняющееся различным начальным и граничным условиям.

2.2.1 Дискретное распределение частиц по размерам

Смолуховский (1916) вывел первое уравнение, описывающее влияние коагуляции частиц на дискретное распределение частиц по размерам в результате броуновского движения и движения, вызванного ламинарным сдвигом. Уравнение относится к внутренним процессам. При дискретном распределении частиц по размерам в результате коагуляции между частицами частицы удаляются как из бункеров, так и добавляются в них. Если две частицы масс m и m сталкиваются и впоследствии коагулируют, масса образующейся частицы равна $m_3 = m_1 + m_2$. Если $K(m, m_2)$ и n_2 является скоростью коагуляции между частицами массы m_1 и m_2 тогда $dn_1/dt = -K(m_1, m_2) n_1 n_2$, $dn_2/dt = -K(m, m_2) n_1 n_2$ и $dn_3/dt = K(m, m_2) n_1 n_2$. Имеется чистый убыток в размере одной номинальной-1 время на одно событие коагуляции, но общая масса сохраняется. Обобщая эти уравнения, получаем:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{j+k} K(m, m) n_j n_k - \sum_{k=1}^{\infty} K(m, m) n_k \quad (2.5)$$

где $j + k = k$ означает, что суммирование производится по тем точкам размерной сетки, для которых $k = m_j + m_k$. Фактор $1/2$ позволяет избежать чрезмерного подсчета. Здесь k включает все частицы по размеру бункера k . Первое слагаемое в правой части (RHS) уравнения 2.5 представляет выигрыш в ячейке k из-за коагуляции между более мелкими частицами, тогда как второй член представляет потерю частиц из бункера по размеру k из-за коагуляции частицами в бункерах всех размеров (включая случаи коагуляции между двумя частицами, обе из которых находятся в бункере). Теория коагуляции частиц подробно рассмотрена в работах Фукса (1964), Фридлендера (2000), Уильямса и Лоялки (1991) и Сайнфельда и Пандиса (2006).

Если функция частоты столкновений $K(m, m)$ является постоянным и не зависит от размера частиц, и обозначается K , уравнение для дискретного распределения по размерам может быть решено аналитически, чтобы получить (Дроссинос и Хусиадас, 2006):

$$n(t) = \frac{N}{1 + \frac{Kt}{\tau}} \quad (2.6)$$

где N - начальное общее количество частиц в единице объема, а τ - характеристика шкала времени агломерации ($\tau = 2/K$). Для броуновской коагуляции идентичных частиц диаметра d коэффициент диффузии D , в жидкости с динамической вязкостью μ при абсолютном температуре T , (постоянная) частота столкновений оценивается как:

$$K = 8 D_p d = 8 k_B T / 3 \mu \quad (2.7)$$

Обобщение уравнения Смолуховского включает другие внутренние процессы. С учетом конденсации и испарения зависящее от времени уравнение для дискретного распределения по размерам становится (Friedlander, 2000):

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{j+k} K(m, m) n_j n_k - \sum_{k=1}^{\infty} K(m, m) n_k + \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k n_{k+1} - \alpha_k n_k \quad (2.7)$$

α_k является двумя последними модели RHS конденсации и испарения. Термин поток испарения α_k является эффективной площадью поверхности испарения k -мер. Предполагается, что испарение происходит за счет потери отдельных молекул.

2.2.2 Непрерывное Распределение частиц по размерам

Непрерывное распределение введено для объемов частиц, значительно превышающих молекулярный объем. В этом случае дискретное распределение $n(r, t)$ может быть заменено непрерывным

распределение $n(r, t)$. Переменная r относится к местоположению распределения в

пространстве и к объему частицы. Изменение значения $n(r, t)$ со временем может быть

выражено как (Фриллендер, 2000): $\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n \mathbf{v}) = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{D}{r^2} \frac{\partial n}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{D}{r^2} \frac{\partial n}{\partial r} \right)$

где $\mathbf{v}$ представляет собой среднюю скорость частиц. Первый член в RHS соответствует превращению газа в частицы, а второй - коагуляции частиц. Для транспортных механизмов, которые можно считать действующими независимо (разумное предположение для аэрозольных частиц), и для частиц с пренебрежимо малой инерцией средняя скорость частиц становится:

$$\mathbf{v} = -D \nabla \ln n + \mathbf{v}_{\text{внутренний}}$$

где $\mathbf{u}$ - скорость жидкости и $\mathbf{v}^{\text{ext}}$ - сумма всех других транспортных скоростей; например, термофоретический, электростатический, гравитационный и т.д.

Были разработаны два основных метода моделирования динамики аэрозоля с использованием подробного распределения аэрозоля по размерам: секционный метод и моментный метод. Численные методы обычно не учитывают пространственные неоднородности и предполагают, что аэрозоль хорошо перемешан в пространстве. Следовательно, численные методы одинаково хорошо применимы к уравнению 2.7 и к его непрерывному обобщающему уравнению 2.8. Основная цель состоит в том, чтобы решить проблему аэрозольного GDE с использованием комплексного метода для учета сложности динамики распределения аэрозоля по размерам (Сейнфельд и Пандис, 2006). Однако, поскольку включение подробных моделей динамики аэрозолей в мезомасштабное или региональное моделирование является сложной и требующей больших вычислительных затрат задачей, были введены различные упрощения за счет исключения конкретных терминов GDE.

При секционном методе распределение по размерам делится на несколько ячеек (секций), расположенных на логарифмическом расстоянии друг от друга. Общепринятое предположение состоит в том, что все частицы в каждой секции имеют одинаковый химический состав (внутреннее смешанное предположение).

В моментальном методе моменты распределения аэрозоля по размерам выражаются через параметры распределения. Наиболее важные моменты распределения аэрозоля по размерам относятся к определению общей количественной концентрации, среднего геометрического диаметра и средней площади поверхности и объема на частицу (Friedlander, 2000).

2.3 Зарождение: образование новых частиц

Зарождение - это начальная стадия фазового перехода первого рода, который имеет место в различных энергетически метастабильных или нестабильных системах (Дебенедетти, 1996). Однородные ядерные вания понимается образование новых частиц при отсутствии уже существующих частиц. Он имеет несколько применений в различных областях, начиная от атмосферных исследований и заканчивая образованием наночастиц в выбросах двигателей или процессах сгорания в целом.

В атмосфере, где различные конденсируемые пары присутствуют в низких концентрациях, бинарное (двухкомпонентное) или многокомпонентное зарождение является преобладающим механизмом образования частиц (Сайнфельд и Пандис, 2006; Лазаридис, 2011). Даже несмотря на однородность

образование зародышей не является важным механизмом для определения массового распределения аэрозоля по размерам, оно обеспечивает источник многочисленных новообразованных частиц, которые формируют распределение по размерам.

2.3.1 Классическая теория зарождения

Классическая теория нуклеации (CNT) была разработана Беккером и Дерингом (1935) и Зельдовичем (1942) для изотермической нуклеации. Она основана на феноменологической концепции капли, которая рассматривается как группа молекул, которые сильно взаимодействуют между собой и слабо с остальной частью системы. Согласно классической теории, зарождающийся кластер рассматривается равновесной термодинамикой как макроскопическая капля, свободная энергия образования которой в решающей степени зависит от объемного поверхностного натяжения. Скорость образования зародышей экспоненциально зависит от обратимой работы образования кластеров, поскольку образование зародышей является активированным процессом.

Кинетика, с помощью которой небольшие кластеры новой фазы набирают или теряют молекулы, основана на идеях, разработанных в химической кинетике. Предполагается, что кластеры растут или сжимаются за счет увеличения или потери отдельных молекул, что является приемлемым приближением для конденсации неассоциированных паров при низких давлениях. Однако классической теории, являющейся феноменологическим подходом, не хватает прочной микроскопической основы.

Гомогенное унарное (однокомпонентное) образование зародышей происходит в пересыщенном паре. Коэффициент насыщения химического вещества A в воздухе при температуре T определяется как:

$$S = \frac{p}{p_{\text{sat}}(T)} \quad (2.9)$$

где p является парциальным давлением конденсируемых газообразных компонентов A и $p_{\text{sat}}(T)$ является давлением насыщения A , который находится в равновесии с жидкой фазой при температуре T (на плоской границе раздела пар - жидкость).

Теория образования зародышей основана на решении системы уравнений, которая описывает изменение концентрации кластеров при добавлении или вычитании молекул (Дебенедетти, 1996). Предполагается, что кластеры взаимодействуют с молекулами воздуха со скоростью, которая уравнивается термически за периоды времени, которые малы по сравнению с периодом, необходимым для добавления или вычитания молекулы. Это означает, что кластеры имеют ту же температуру, что и окружающая среда. В атмосфере происходит гомогенное образование ядер в основном с участием двух или более химических соединений.

Кинетический метод теории нуклеации предполагает, что кластеры увеличиваются или уменьшаются в размере при добавлении или удалении одной молекулы для неассоциированных паров. Следовательно, если $N_j(t)$ - неравновесная числовая концентрация j -кластеры молекул, следующие уравнения описывают изменение концентрации кластеров:

$$\frac{dN_j}{dt} = \beta_{j-1} N_{j-1}(t) - \alpha_j N_j(t) - \beta_j N_j(t) + \alpha_{j+1} N_{j+1}(t) \quad (2.10)$$

где β_j представляет собой прямой (конденсационный) молекулярный поток в единицу времени и площади, при котором j -кластер приобретает молекулу и обратный поток (испарение), при котором кластер теряет молекулу. (Уравнение 2.10 представляет собой частный случай GDE для одномолекулярной коагуляции/фрагментации при отсутствии других процессов (см. Уравнение 2.7) и постоянной концентрации одной молекулы.)

Предполагается, что концентрация кластеров находится в устойчивом состоянии, и поэтому все потоки равны стабильному потоку J :

$$J_{n-12} = J \quad \text{для всех } n \quad (2.11)$$

Выражение для потока зародышеобразования может быть получено как (Дебенедетти,

1996; Лазаридис, 2011): $J = N_1 \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n f_n$

и и и

трудно определить теоретически и, следовательно, кинетическую. Проблема скорости испарения для оценки потока образования зародышей становится проблемой термодинамики для оценки равновесного распределения капель. Для этого расчета необходимо изучить энергию, необходимую для образования кластера.

Радиус радиуса кластера, содержащий n молекулы задаются с помощью:

$$r_n = \frac{\sigma v^2}{(-\Delta \mu)} \quad (2.13)$$

v

σ

μ где - молекулярный

объем в жидкой фазе, поверхностное натяжение и Δ разницы химических потенциалов между жидкой фазой (кластером) и газообразной фазой. В предположении, что жидкость несжимаема, а пар - идеальный газ,

разность химических потенциалов может быть выражена через коэффициент насыщения $-\Delta = k_B T \ln S$.

Свободная энергия образования n -кластер рассчитан с использованием приближения капиллярности. В этом приближении свободная энергия кластера определяется путем рассмотрения кластера как несжимаемой макроскопической сферической капли с макроскопическими (объемными и поверхностными) свойствами. Свободная от капель минимальная свободная энергия, которая требуется для образования кластера с n молекулы, могут быть выражены как:

$$\Delta G_n = \frac{4\pi r_n^2 \sigma + \frac{4}{3}\pi r_n^3 \rho \Delta \mu}{A(-\Delta \mu)} \quad (2.14)$$

Далее предполагается, что существует равновесное распределение кластеров. Следовательно, распределение кластеров может быть выражено как:

$$n_n = n_1 \exp \left(- \frac{\Delta G_n}{k_B T} \right) \quad (2.15)$$

где свободная энергия n -кластер равен ΔG_n , k_B является постоянной Больцмана и T является температурой. За константу пропорциональности принимается общее газовое (молекулярное) число плотность объемного метастабильного состояния n_1 .

Скорость зародышеобразования в соответствии с классической теорией может быть выражена как:

$$J = J_0 \exp \left(- \frac{\Delta G^*}{k_B T} \right) \quad (2.16)$$

где J_0 является кинетическим предфактором и ΔG^* - свободная энергия образования критической капли. Выражение кинетического префактора для унарного зарождения может быть записано как (Лазаридис и Дроссинос, 1997):

$$\beta v_0 J_0 = A Z \quad (2.17)$$

где A площадь поверхности капли,

β – средняя скорость роста, Z тот самый Зельдович

ρ_v – численная плотность конденсируемого пара.

Коэффициент неравновесности роста и скорость, также известные как скорость столкновения на единицу площади, рассчитываются на основе кинетической теории газов (с единицей коэффициента аккомодации).

Неравновесный фактор Зельдовича возникает из-за флуктуаций числа в критическом кластере:

$$\sigma = Z (2.18) \pi^2 (r^*) (k_B T)^{1/2} \quad (2.18)$$

Критическая свободная энергия капли, выраженная в терминах критического радиуса, равна:

$$\Delta G^* = \frac{\pi^4}{3} r^{*2} \sigma \quad (2.19)$$

Для сферических кластеров число

n^* молекул в критическом кластере становится:

$$n^* = \frac{32}{3} \frac{\pi (D_{23} \sigma)^{1/2}}{\rho (-\Delta)} \quad (2.20)$$

где Δ^0 , который меньше 1, представляет собой разницу между химическими потенциалами в стабильном и метастабильном состояниях (жидкая и газообразная фазы).

Конечное выражение, которое дает скорость зародышеобразования на единицу объема в соответствии с УНТ, становится:

$$J_{\text{УНТ}} = J_{\text{оCNT}} \frac{(\Delta G^*)}{k_B T} = \nu_{\text{vap}}^2 \frac{\sigma^2}{\pi m_{\text{mol}}} \text{опыт} - 163 \frac{\pi}{(k_B T)^{3/2}} \frac{1}{(\ln S)^2} \quad (2.21)$$

где используется численная плотность в паровой фазе: n_{vap}

$$= p_{\text{vap}} / (k_B T).$$

Обратите внимание, что экспрессия CNT иногда делится на коэффициент насыщения (Сейнфельд и Пандис, 2006), поправка, которая возникает из-за другого подхода к кинетике зародышеобразования.

Подробные описания УНТ и других подходов к изучению образования зародышей даны Дебенедетти (1996) и Дроссиносом и Хусиасом (2006).

2.3.2 Многокомпонентная нуклеация

"Многокомпонентная нуклеация" относится к процессу нуклеации, в котором участвуют смеси газообразных компонентов даже в ненасыщенных условиях. Это противоречит унарному образованию ядер, где требуется пересыщение..

Многокомпонентная нуклеация имеет множество применений в атмосферных условиях, где существует несколько конденсирующихся газов при низких концентрациях.

В недавней работе Кеврекисис *et al.* (1999) использовали метод, представленный Лангером (1969), для определения скорости зарождения в бинарных системах. Их результат формально идентичен результату Стауффера (1976) для бинарной нуклеации, но его гораздо проще оценить. Соответственно, бинарная скорость образования зародышей для неассоциированных паров равна (см. Также Дроссинос и Хусиас, 2006):

$$J_{\text{нук}} = \frac{\exp(-\Delta^* G_{k_B T} n_{\text{vap}})}{2(D_{122} - D_{11} D_{22})^{1/2}} \left[\frac{D_{11} P_{11} D_{22} R_{22}}{D_{11} P_{11} D_{22} R_{22}} + 4 D_{122} R_{11} R_{22} \right] \quad (2.22)$$

где $n_{vap} = n_{vap1} + n_{vap2}$ является общей численной плотностью конденсирующихся паров и R_{ij} является

тензор роста капли. Переменная γ_{ij} является матрицей производных второго порядка от свободной энергии капли по отношению к числу молекул n_i каждого вида, оцениваемого в седловой точке. Как и при унарной нуклеации, матрица роста выражается как произведение площади поверхности капли на скорость столкновения молекулы определенного вида j , $R =$

$\delta \beta \pi \delta_{adj}^4 (s^2 r)_{ij}$, где находится символ Кронекера (Дроссинос и Хусиадас, 2006).

2.3.3 Гетерогенная Нуклеация

В большинстве случаев взвешенные частицы находятся в атмосфере, и на их поверхностях происходят фазовые переходы (зарождение) из газообразной фазы в жидкую. Предположим, что на поверхности частицы образуется жидкий зародыш. Гетерогенное образование зародышей на нерастворимых частицах происходит при более низких коэффициентах насыщения, чем гомогенное образование зародышей. Минимально необходимая работа приведена Лазаридисом, Кулмалой и Лааксоненом (1991):

$$\Delta G_{het} = \sigma_{gs} F + (\sigma_{sl} - \sigma_{gl}) F_{gsls} + (P - P^*) V + \sum_i \mu_i (n_i - n_i^*) + \sum_i \mu_i (T - T^*) n_i \quad (2.23)$$

σ относится к межфазным напряжениям между различными фазами, индексам g и l к тому, где рассматривается фаза (g относится к газообразному, s к твердой и l к жидкой фазе) и n к числу молекул в кластере.

Согласно классической теории, свободная энергия образования критического кластера на плоской поверхности изменяется следующим образом (Лазаридис, Кулмала и Лааксонен, 1991; Дроссинос и Хусиадас, 2006):

$$\Delta G_{het}^* = \Delta G_{hom}^* f(\theta) \quad (\text{потому что}) \quad (2.24)$$

где угол θ , который может варьироваться от 0 до 180°, представляет собой угол соприкосновения зарождающегося кластера с твердой подложкой. При образовании зародышей воды твердое вещество считается гидрофобным или гидрофильным в зависимости от того, больше или меньше угол контакта 90°.

Как и в случае гомогенного зародышеобразования, скорость гетерогенного зародышеобразования J_{het} может быть выражается как произведение кинетического предфактора J_{het}^0 умноженный на коэффициент Аррениуса:

$$J_{het} = J_{heto}^{опыт} \exp\left(-\frac{\Delta G_{het}^*}{k_B T}\right) \quad (2.25)$$

Кинетический предфактор может быть выражен как:

$$J_{heto} = R_{рост} N_{реклама} \quad (2.26)$$

темпы роста кластера, Z неравновесный фактор Зельдовича и N где $R_{рост}$ произведение общего количества молекул, адсорбированных на единицу площади поверхности затравочной частицы (моль/м²) на затравочную частицу (Лазаридис, Кул- мала и Лааксонен, 1991). Полезным приближением является рассмотрение $A_{реклама}$ площадь поверхности

это дает максимальную скорость зародышеобразования (πd_p^2), где d_p - диаметр затравочных частиц, а n - приближение, допускающее наличие нескольких кластеров на затравочную частицу.

Следовательно, гетерогенную скорость зарождения можно записать как:

$$J_{het} = \pi d_p^2 R_{рост} N_{реклама} Z_{опыт} \exp\left(-\frac{\Delta G_{het}^*}{k_B T}\right) \quad (2.27)$$

Адсорбированные молекулы (N_{ad}) имеют концентрацию, равную $N_{рекламные щиты}$ $= \beta_{рекламные щиты} \tau$, β_{ad} - скорость столкновения молекул пара на единицу площади поверхности и где среднее время $\tau =$

молекула адсорбированного пара остается на поверхности частицы. Последняя может быть записана как)

$\Phi_{опыт} L$, где L является теплотой адсорбции и R газовая постоянная. Характеристика $\Phi_{опыт}$

временная шкала частота колебаний двух гармонически связанных молекул ω^T $= 2 \pi \nu^{1/2}$, где U является потенциалом межмолекулярного взаимодействия и μ является уменьшенная масса.

Вероятность активации частицы $P_a(t)$ представляет собой отношение концентрации активированных частиц к $N_a(t)$ к начальной концентрации (инактивированных частиц) N d, in^3

$$P_a(t) = \frac{N_a(t)}{N_a} = 1 - \exp(-kt) \quad (2.28)$$

где k - скорость активации на одну ранее существовавшую частицу. Если активация частиц происходит посредством гетерогенной генной нуклеации, константа скорости активации принимается за скорость гетерогенной нуклеации. Частицы считаются активированными, если вероятность их активации больше или равна 0,5. Подробное описание классической гетерогенной нуклеации и ее применения для активации частиц в конденсационных счетчиках частиц можно найти в Giechaskiel *et al.* (2011).

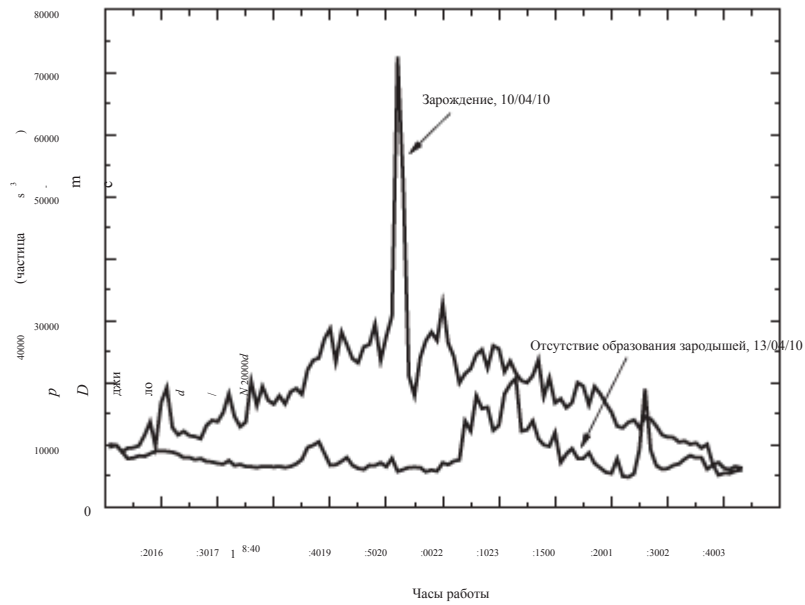
2.3.4 Образование зародышей в атмосфере

Образование новых частиц в атмосфере наблюдалось вблизи загрязненных источников и в чистых отдаленных регионах (Кулмала *et al.*, 2004). Нуклеационные всплески (homogeneous нуклеации) могут быть ответственными за появление нового образования частиц в чистых средах, где фоновые концентрации аэрозоля невысока ("Сайнфелд" и Pandis, 2006).

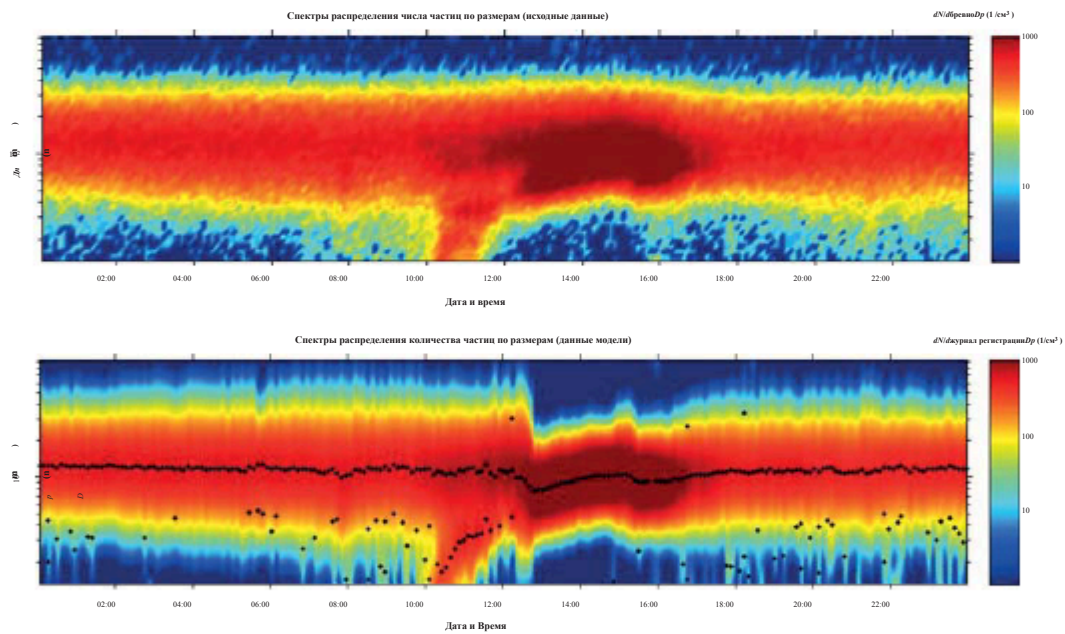
Основной характеристикой события зарождения является увеличение концентрации аэрозоля в окружающей атмосфере. На рисунке 2.2 показано сравнение распределения численности в зависимости от времени в течение двух дней (с событием зарождения и без него), измеренного на исследовательской станции Акротири (Ханья, Греция). Можно отметить, что во время зарождения взрыва общее количество находящихся в воздухе атмосферных частиц значительно и быстро увеличилось. Точнее, концентрация частиц увеличилась в среднем на 46%, при максимальном значении $72 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$

10 Апреля 2010 года (Лазаридис *et al.*, 2008) (увеличение на 92%) через 6 часов. Это событие образования зародышей наблюдалось на

Другой характерный случай события зарождения представлен на рисунке 2.3. 7 июля 2009 года было зарегистрировано событие зарождения, начавшееся примерно в 10.00 утра и продолжавшееся до 17.30 вечера (по местному времени). Было подсчитано, что максимальные количественные концентрации частиц с аэродинамическим диаметром менее 51,3 нм и менее 101,1 нм соответствовали 37 и 71% от общей количественной концентрации частиц соответственно. Более того, во время события числовая концентрация составила 793 ± 281 частицу см^{-3} , принимая во внимание, что в течение более чем 3 часов концентрация была выше порога в 1000 частиц см^{-3} , с максимальным значением, превышающим 1200 частиц см^{-3} .



Сравнение события зарождения и дня без события, наблюдаемого в Акротири *Рисунок 2.2* исследовательская станция, Крит, Греция.



Событие образования новых частиц, наблюдавшееся летом 2009 г. (7 июля) на *Рисунок 2.3* Исследовательская станция Акротири (наблюдения и смоделированные данные), Крит, Греция. Цветовое исполнение смотрите в разделе "Табличка".

2.4 Рост за счет конденсации

Размер частиц в атмосфере изменяется в основном за счет конденсации водяного пара и процессов испарения. Скорость увеличения размера частиц зависит от относительной влажности, размера частиц и относительных размеров частиц по сравнению со средней длиной свободного пробега газа.¹

Другие перенасыщенные пары в атмосфере могут участвовать в росте частиц.

Конденсация или испарение вызваны разницей давлений между окружающим давлением пара и давлением пара на поверхности частицы. Направление чистого потока пара (испарение или конденсация) зависит от их относительной величины. В начале процесса роста частиц диаметр зародышевых частиц меньше, чем длина свободного пробега газа. В этих условиях скорость роста частиц зависит от скорости случайных молекулярных столкновений между частицами и молекулами водяного пара. Скорость увеличения диаметра частиц приведена Лазаридисом (2011):

$$\frac{d(p_d)}{dt} = \frac{2Ma(p - p_s)}{p N_{O_2} \pi 2 \pi kT} \quad \text{для} \quad p_d < \lambda \quad (2.29)$$

- парциальное давление водяного пара вокруг частицы, но на большом расстоянии, где p_s с его поверхности, p_d представляет собой частицу водяного пара на поверхности частицы, a_c является коэффициентом конденсации, определяющим процентное содержание молекул, которые прилипают к поверхности частицы после столкновения, M - молекулярная масса жидкости, ρ - плотность жидкости и N_a является число Авогадро.

Когда размер частиц становится значительно больше, чем средняя длина свободного пробега газа, скорость роста частиц связана со скоростью диффузии молекул к поверхности частиц. Скорость увеличения диаметра частиц (d) может быть записан как:

$$\frac{d(p_d)}{dt} = \frac{4MD_v}{d \rho_p R} \left(\frac{p_s}{a_c T} - \frac{p}{d T} \right) \phi \quad \text{для} \quad p_d > \lambda \quad (2.30)$$

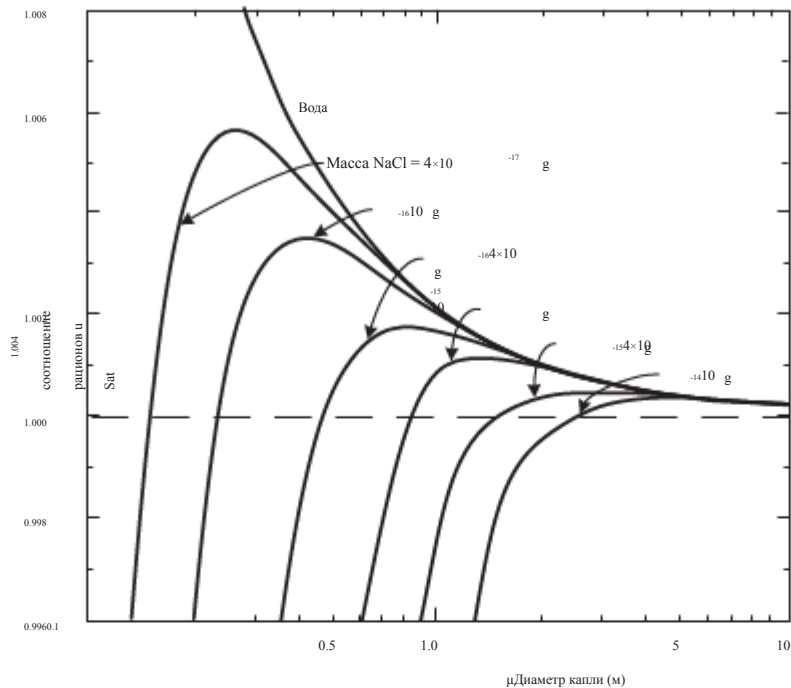
ϕ является поправочным коэффициентом Фукса. Уравнение 2.30 основано на том, что R является газовой постоянной и по теории молекулярной диффузии на поверхности капли. Уравнение диффузии, а также концепция разности давлений недействительны для расстояний менее одного свободного пробега газа от поверхности капли. Был введен ряд приближений, основанных на так называемых "поточковых методах согласования", среди которых поправочный коэффициент Фукса, также известный как поправочный коэффициент Кнудсена. Поправочный коэффициент Фукса задается формулой:

$$\phi = \frac{2 + \frac{\lambda}{d_p}}{\lambda_p^2 + 5.33(\frac{\lambda}{d_p}) + 3.42} \quad (2.31)$$

Быстрое увеличение размера капель также приводит к повышению температуры из-за скрытого выделения тепла при конденсации.

Атмосфера в основном состоит из растворимых частиц. Мы рассмотрим обычную атмосферную сферическую растворимую частицу, хлорид натрия, чтобы обсудить, как меняется его размер. Когда соль растворяется в воде, температура кипения раствора повышается, а температура замерзания снижается из-за снижения давления водяного пара. Сродство растворенного

¹ Средний свободный газовый путь определяется как среднее расстояние переноса молекулы между двумя последовательными ударами. При стандартных условиях температуры окружающей среды и давления длина свободного пробега воздуха составляет приблизительно 66 нм.



Коэффициент насыщения в зависимости от размера капли для чистой воды и для воды, содержащей капли. **Рисунок 2.4** растворенный хлорид натрия при температуре 293 K (20°C). Область над каждой кривой - это область конденсации, а область под ней - область испарения.

соль для молекул воды позволяет формировать стабильные капли в насыщенных или недостаточно насыщенных средах.

При изменении размера растворимой частицы возникают два конкурентных механизма. Концентрация соли внутри капли увеличивается с уменьшением ее размера. Одновременно следует учитывать эффект Кельвина; это приводит к увеличению давления пара на поверхности капли при уменьшении ее размера. Соотношение между коэффициентом Кельвина K и размер капли, содержащей растворенные химические компоненты, записывается как:

$$rK = \frac{p}{p_s} = 1 + \frac{6 \pi M_w}{M_s \rho \pi d_p^3} \quad \text{опыт} \quad \left(\frac{4 M_w}{\rho_p R T d} \right) \quad (2.32)$$

где m является массой растворенного химического компонента массы M_s , M_w молекулярный масса растворителя (обычно воды), ρ плотность растворителя и γ количество ионов, на которые диссоциирует молекула соли. На рисунке 2.4 показано, что присутствие растворенной соли резко изменяет кривую чистой воды (сплошная линия).

2.5 Коагуляция и агломерация

Аэрозоли в атмосфере могут сталкиваться в результате их броуновского движения или гидродинамических, электрических или гравитационных сил. Эти столкновения приводят либо к коагуляции частиц, когда сталкивающиеся первичные частицы сливаются вместе и теряют свою идентичность, либо к агломерации, когда они сохраняют свою идентичность и форму. Оба механизма имеют решающее значение

к изучению распределения частиц по размерам в атмосфере (Фридлендер, 2000; Дроссинос и Хусинадас, 2006). Эффект столкновений частиц в атмосфере хорошо описывается уравнением Смолуховского, которое обычно выражается в объемных координатах частиц (Williams and Loyalka, 1991). Коагуляция Смолуховского уравнение может быть записано в терминах непрерывных или дискретных распределений; например, см. Уравнение 2.5 (Уильямс и Лоялка, 1991; Сайнфельд и Пандис, 2006). Коагуляция частиц приводит к уменьшению количества частиц и увеличению их размера (диаметра).

2.5.1 Броуновская коагуляция

Здесь мы рассмотрим броуновское движение, возникающее в результате относительного перемещения частиц, также называемое термической коагуляцией. Будет рассмотрен простой случай для сферических частиц диаметром более 0,1 мкм. Мы предполагаем, что частицы коагулируют после каждого столкновения и что первоначальное изменение размера частиц невелико. Кроме того, мы фокусируемся на одной частице (которая не подвергается броуновскому движению) и рассматриваем диффузионный поток других частиц к ее поверхности.

Количество частиц $N(t)$ во время t задается с помощью:

$$N(t) = \frac{N_0}{1 + N_0 K_d t} \quad (2.33)$$

где N_0 - начальное количество частиц и K_d - коэффициент коагуляции, который является определяется соотношением $K_d = \frac{4D}{\pi \rho d}$ (m^3 / c) (ρ - диаметр частиц и D является диффузионным-коэффициентом сионирования). Уравнение 2.33 можно легко получить из уравнения 2.6, отметив, что

$$N(t) = \sum_k n_k(t) \quad \text{и что в уравнении 2.6 центральная}$$

частица также находится в броуновском движении (в = 1 описывает относительные движения K_d в каком случае коэффициент диффузии в выражении для $D = D_{12}$ = $2D_1$ где D_1 является коэффициентом диффузии одной частицы).

Скорость коагуляции, полученная с помощью дифференцирующего уравнения 2.33, пропорциональна N^2 , что обозначает высокие скорости увеличения концентрации частиц (Lazaridis, 2011). Уравнение 2.33 неприменимо для изменений концентрации на расстояниях приблизительно одного свободного пробега газа от поверхности частицы; следовательно, область его действия ограничена частицами размером более 0,1 мкм. Важность неkontинуальных эффектов возрастает с уменьшением диаметра; они становятся значимыми для диаметров меньше 0,4 мкм. Поправка на коэффициент коагуляции была предложена Фуком:

$$K = K_d \beta^2 \quad (2.34)$$

При стандартных условиях (температура 298,15 К и давление 100 кПа) численные значения для функций β и K приведены в таблице 2.1.

2.5.2 Агломерация

Частицы, которые сохраняют свою идентичность при столкновении, агломерируются, образуя сложные структуры. Такие агрегаты образуются в выбросах, например, при сжигании в дизельных двигателях, сжигании угля на электростанциях и промышленном производстве мелких частиц. Морфология агрегатов и гидродинамические свойства влияют на их распределение по размерам, поведение при осаждении и агломерации.

Коэффициенты коагуляции при стандартных условиях. Таблица

2.1 Диаметр (μm) Поправочный коэффициент, β, K(м³/с)		K (м³/с)	
0.004	0.037	168 · 10 ⁻¹⁶	16 · 6.2 · 10 ⁻¹⁶
0.01	0.14	168 · 10 ⁻¹⁶	9.5 · 10 ⁻¹⁶
0.04	0.58	19 · 10 ⁻¹⁶	10.7 · 10 ⁻¹⁶
0.1	0.82	8.7 · 10 ⁻¹⁶	7.2 · 10 ⁻¹⁶
0.4	0.95	4.2 · 10 ⁻¹⁶	4.0 · 10 ⁻¹⁶
1.0	0.97	3.4 · 10 ⁻¹⁶	3.4 · 10 ⁻¹⁶
4	0.99	3.1 · 10 ⁻¹⁶	3.1 · 10 ⁻¹⁶
10	0.99	3.0 · 10 ⁻¹⁶	3.0 · 10 ⁻¹⁶

Адаптировано по Hinds (1999).

Как правило, первичные частицы, составляющие агрегат, являются полидисперсными.

Однако, для простоты и в отсутствие соответствующих теоретических моделей мы будем анализировать только агрегаты, состоящие из идентичных сферических мономеров. Форрест и Виттен (1979), анализируя агломерацию ультрадисперсных частиц дыма, были первыми, кто предположил, что полученные агломераты образуют фракталоподобные (квазифрактальные) структуры, подчиняющиеся следующему закону масштабирования (в конечном диапазоне размеров):

$$N = k_f \frac{R_g^{d_f}}{R_1^{d_f}} \quad (2.35)$$

где N это количество первичных частиц, образующих агрегат, d_f фрактальное (или хаусдорфово) измерение, k_f фрактальный префактор, R_g радиус вращения и R_1 радиус первичных частиц. Фрактальная размерность обеспечивает количественную меру степени, в которой структура заполняет физическое пространство: компактный трехмерный объект обладает

$d_f = 3$, тогда как линия имеет $d_f = 1$. Фрактальный префактор, важность которого была оценена в первую очередь -

автор: Ву и Фридлендер (1993), является показателем локальной структуры агрегата. Для идентичных мономеров равной массы радиус вращения, геометрическая мера распределения массы вокруг центра масс агрегата, становится среднеквадратичным расстоянием мономеров от центра масс кластера:

$$R_g^2 = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N (r_s - R_{CM})^2 + a^2_{CM} \quad (2.36)$$

где r_s является положением мономера, а центр масс кластера равен

$$R_{CM} = \frac{\sum_{i=1}^N r_i}{N}$$

Дополнительный термин a^2 часто добавляется для обеспечения того, чтобы масштабирование R_{CM}

закон остается в силе даже тогда, когда число мономеров стремится к единице. Он может быть выбран как либо радиус мономера, либо, предпочтительно, радиус вращения мономера $a = R_1$

Фрактальная размерность зависит от механизма агломерации: компьютерное моделирование широко использовалось для изучения фрактальной размерности агрегатов, образованных в результате агрегации частиц-кластеров или кластер-кластеров в двух и трех измерениях, при этом механизм агломерации является диффузионным, реакционно-ограниченным или баллистическим. Например, трехмерное моделирование кластера с ограниченной диффузией-прогноз роста кластера $d_f \sim 1.80$ а рост скоплений частиц дает $d_f \sim 2.50$ (см., например, Таблицу 1.6 в Colbeck, 1998).

Наиболее изученными агрегатами являются те, которые образуются в результате ограниченной диффузией кластер-кластерной агрегации (DLCA) или ограниченной реакцией кластер-кластерная агрегация (RLCA). Для обеих групп механизмом агломерации является диффузия, разница обусловлена вероятностью прилипания кластера к мономеру, которая равна единице для кластеров DLCA и приблизительно 0,001 для кластеров RLCA. Наиболее часто используемыми параметрами закона масштабирования являются ($d_f = 1.8$, $k_f = .13$) для агрегатов DLCA и (2.05 0.94) для кластеров RLCA.

Следует отметить, что фракталоподобный закон масштабирования справедлив в статистическом смысле, поскольку агрегатные свойства становятся самоподобными после усреднения по ансамблю по многим агрегатам. В этом смысле агрегаты напоминают случайные изотропные фракталы, проявляющие присущую им случайность, которая становится самоподобной только в статистическом смысле. Более того, поскольку совокупности имеют конечную протяженность, они никогда не бывают в точности самоподобными. Они проявляют самоподобие в конечном диапазоне масштабов; по этой причине их называют "фракталоподобными агрегатами". Эти наблюдения становятся более точными, когда мы рассматриваем усредненную по ориентации корреляционную функцию мономер-мономер $g(r)$. Его физическая интерпретация заключается в том, что он дает вероятность (на единицу объема) обнаружения мономера на расстоянии r из другого, произвольно выбранного мономера. Аналитическое выражение для $g(r)$ является крайне желательным, поскольку от него зависят структурные и динамические свойства агрегата. Часто используемое выражение:

$$g(r) = \frac{A}{r^d} e^{-\frac{r}{R}} \quad (2.37)$$

где A является константой (определяется из условия нормализации, согласно которому пространственный интеграл от $g(r)$ по объему системы, равному числу мономеров). Алгебраический распад возникает из-за масштабирования, а растянутый экспоненциальный - из-за отсечки функция моделирует эффекты конечного размера. Длина корреляции ξ является мерой фрактала диффузный интерфейс и ν является показателем растяжения. Наиболее точное выражение для $g(r)$ на сегодняшний день было предложено Латтуадой, Ву и Морбиделли (2003а), которые оценили важность мелкомасштабной структуры (отсутствующей в уравнении 2.37, которое становится более точным по мере увеличения количества мономеров). Показатель растяжения был определен равным 2,02 (Хейнсон, Соренсен и Чакрабартти, 2012) или 2,20 (Латтуада, Ву и Морбиделли, 2003б) для кластеров DLCA и 2,16 для кластеров RLCA (Латтуада, Ву и Морбиделли, 2003б). Предел $\nu \rightarrow \infty$ соответствует четкой агрегированной границе раздела, где закон масштабирования, уравнение 2.35, выполняется в точности до четкой границы раздела.

Подвижность N -мономерные фракталоподобные агрегаты обычно выражаются в терминах радиуса подвижности R_m , определяемый через коэффициент трения Стокса:

$$\zeta = \frac{1}{N B} = \frac{k_B T}{N D} = \frac{\pi \eta (6 m)^R}{C_m R} \quad (2.38)$$

где $N \zeta$ является совокупной механической подвижностью, $N D$ коэффициент диффузии Стокса-Эйнштейна-эффективный, k_B постоянная Больцмана, η вязкость жидкости, C_m коэффициент коррекции скольжения Каннингема (см. Уравнение 2.44) и T абсолютная температура. В непрерывных режимах импульса и массопереноса (единичный поправочный коэффициент скольжения) радиус подвижности равен гидродинамическому радиусу R . Здесь мы сосредоточимся на эмпирических выражениях для мобильности радиус в режиме континуума.

Недавно Мелас *et al.* (2013), используя методологию, предложенную Иселлой и Дроссиносом (2011), определили гидродинамический радиус усредненных по ориентации агрегатов посредством расчета скоростей столкновений молекул и агрегатов. Последние были получены из

решение уравнения диффузии (уравнения Лапласа вместо уравнений Стокса о ползучем течении) с соответствующими граничными условиями. Анализ их результатов позволил установить следующую эмпирическую зависимость:

$$\frac{R}{r} = 0.248 \cdot 2^{-N} \cdot \left(\frac{R_g}{r} \right)^{0.415} + 0.69 \lambda^{0.415} \quad (2.39)$$

Особенность и полезность уравнения 2.39 заключается в том, что ни фрактальная размерность, ни фрактальный префактор по отдельности не требуются для оценки гидродинамического радиуса. Это контрастирует с большинством эмпирических соответствий, доступных в литературе (см., Например, Обзор подвижности фрактальных агрегатов в Sorensen, 2011), где гидродинамический радиус выражается в терминах статистических свойств кластера, таких как d и k . Согласно к уравнению 2.39, гидродинамический радиус может быть рассчитан для отдельного кластера, если положения мономеров известны (из моделирования или экспериментальных измерений), поскольку независимые переменные не зависят от усредненных по ансамблю свойств.

Предсказания уравнения 2.39 были сравнены с предсказаниями выражения, предложенного Кирквудом и Райзманом (1948) в их новаторском анализе поступательной диффузии коэффициента гибких макромолекул. Выражение Кирквуда-Рисмана для гидродинамического радиуса также является геометрическим выражением, поскольку оно зависит только от положения мономеров; это:

$$\frac{r^{NR}}{R} = 1 + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{m=1, m \neq j}^N \frac{R}{|r_j - r_m|} \quad (2.40)$$

Было обнаружено, что предсказания уравнения 2.40 несколько ниже, чем численное моделирование и эмпирические предсказания (уравнение 2.39) для небольших агрегатов, приближаясь к тому же пределу по мере увеличения количества мономеров.

Учитывая аналитическое выражение для гидродинамического радиуса фракталоподобных агрегатов, будь то это уравнение 2.39 или 2.40, можно определить ядро столкновений Смолуховского между фракталоподобными агрегатами в режиме континуума. Ядро Смолуховского для агломерирующих сфер (i, j) , возникающее в результате их теплового движения (броуновская агломерация), равно:

$$K_{\text{агломер}} = 4 \left(\frac{\pi}{6} \right) m_i r_i^2 + \frac{\pi}{6} m_j r_j^2 (D_i + D_j) \quad (2.41)$$

(для сферических частиц, равных их r^* где первый множитель представляет собой сумму радиусов столкновений геометрических радиусов), а второй множитель представляет собой сумму соответствующих разностных коэффициентов слияния Стокса-Эйнштейна D . Для фракталоподобных агрегатов радиусы столкновений могут быть приняты за радиусы вращения и рассчитаны по закону масштабирования (уравнение 2.35), а коэффициенты диффузии могут быть выражены через гидродинамические радиусы (согласно уравнению 2.38) и, например, уравнение 2.39, для получения:

$$K_{\text{агломер}} = \frac{2k_B T P_1}{3 \eta} \left(\frac{1}{N_i} \left(\frac{R_g}{r_i} \right)^{0.415} + N_j \left(\frac{R_g}{r_j} \right)^{0.415} \right) \left(\frac{1}{R_{\text{привет}}} + \frac{1}{R_{\text{агломер}}} \right) \quad (2.42)$$

Мы предположили, что два агломерирующих агрегата имеют идентичную морфологию, а именно идентичные фрактальные размеры и префакторы. Были предложены более сложные выражения для модификаций ядра Смолуховского в переходном режиме для сталкивающихся фракталоподобных структур; см., например, Тхаджудин, Гопалакришнан и Хоган (2012).

2.6 Механизмы осаждения

Механизмы осаждения ответственны за миграцию аэрозольных частиц, взвешенных в жидкости, и их последующий перенос и осаждение на поверхность или перенос через границы потока (Дроссинос и Хусиадас, 2006). Осаждение - это внешний процесс в GDE. Широко представлено одночастичные отложения появились в Лит-erature (Фридлендер, 2000; в комплексе drossinos и Housiadas, 2006). Исследование одночастичного осаждения в жидкости представлено здесь без ссылки на аспекты, связанные с конвективным переносом и осаждением.

2.6.1 Закон Стокса

Частица, движущаяся в жидкости, испытывает силу сопротивления, называемую сопротивлением Стокса, которая действует в направлении, противоположном ее собственному. Поток вокруг движущейся аэрозольной частицы обычно в режиме Стокса ($Re_p < 1$). Число Рейнольдса частицы (Re_p) может быть выражен как

$$\frac{\rho_d V}{\eta}, \text{ где } V - \text{средняя скорость частицы относительно жидкости и } \rho_d =$$

ρ_d является

кинематическая вязкость (Дроссинос и Хусиадас, 2006).

Суммарная сила, оказываемая жидкостью на движущуюся частицу, может быть получена из решения уравнений Навье - Стокса, которые описывают движение жидкости; приложенная сила получается путем интегрирования нормальной и касательной сил, действующих на поверхность частицы. Кроме того, для мелких частиц передача импульса (от жидкости к частице) не происходит в непрерывном режиме передачи импульса, что приводит к уменьшению силы сопротивления Стокса. Полная сила сопротивления, действующая на малую сферическую частицу со скоростью V в жидкости выражается как (Hinds, 1999):

$$F_D = \frac{3 \pi \eta R \dot{\theta}}{C} \quad (2.43)$$

где C является поправочным коэффициентом, называемым поправочным коэффициентом скольжения

$$\text{Каннингема, заданным через: } C = \frac{\lambda_p d}{1 + 2.34 + 1.05 \text{ опыт } (2.44) \lambda_p d}$$

где λ - средняя длина свободного пробега.

2.6.2 Гравитационное осаждение

Скорость гравитационного оседания сферической частицы в неподвижном воздухе получается из силы сопротивления Стокса, чтобы получить:

$$V_s = \frac{g C_c d^2}{18 \eta} \quad Re < 0.1 \quad (2.45)$$

где g - ускорение под действием силы тяжести и η - вязкость жидкости. Конечная скорость осаждения в уравнении 2.45 быстро увеличивается с увеличением размера частиц. Был включен поправочный коэффициент скольжения, чтобы сделать это выражение справедливым для частиц любого размера.

Величина, которая часто используется в аэрозольной науке, - это механическая подвижность B (в млн^{-1}), который представляет собой отношение конечной скорости частицы к установившейся силе

создание такой скорости (Хайндс, 1999):

$$B = \frac{V}{d^2 F} = \frac{C}{3 \pi \eta d} \quad (2.46)$$

К закону Стокса для несферических частиц применяется поправочный коэффициент, называемый динамическим коэффициентом формы χ . Соответственно, уравнение 2.45 принимает вид:

$$V_s = \frac{\rho_p d^2 g C_c}{18 \eta \chi} \quad (2.47)$$

где эквивалентный объемный диаметр d_e заменяет диаметр частиц. Объем, эквивалентный диаметру d_e является диаметром сферы, имеющей объем частицы. В большинстве

корпусах, динамический форм-фактор

χ имеет значения больше единицы, что означает, что несферический-

частицы оседают с меньшей скоростью осаждения, чем эквивалентные им сферические

χ

частицы. обычно варьируется от 1 (сфера) до 2. Динамические значения коэффициента формы

для различных частиц формы можно найти в работе Hinds (1999).

Характерным диаметром частиц, который широко используется в аэрозольной науке и технологии,

является эквивалентный аэродинамический диаметр, который однородным образом

отражает размер частиц. Он определяется как диаметр сферы плотностью 1 г/см^3 и та же

скорость оседания, что и у исследуемой частицы. Аэродинамический диаметр d_{ae}

можно соотнести со временем пребывания частиц в атмосфере и их отложением в организме человека. Он связан с объемным эквивалентным диаметром через:

$$d_{ae} = d_e \sqrt{\frac{C_c(d_e) \rho}{C_c(d_{ae}) \rho_0}} \quad (2.48)$$

где ρ - плотность частиц, тогда как

$\rho_0 = 1 \text{ г/м}^3$.

Частицы диаметром менее 0,5 мкм лучше описываются термодинамическим эквивалентным

диаметром, также известным как эквивалентный диаметр подвижности, см. Уравнение

2.38, который представляет собой диаметр сферической частицы, имеющей тот же

коэффициент диффузии, что и исследуемая частица. Эквивалентный термодинамический диаметр

может быть рассчитан с помощью параметров, управляющих диффузией частиц через:

$$d_{te} = \frac{k_B T C_c(d_{te})}{3 \pi \eta D} \quad (2.49)$$

где T - абсолютная температура (310,15 К), k_B

является ли постоянная Больцмана

$(0.014 \times 10^{-23}$

Дж/град) и

η - динамическая вязкость воздуха ($1,90 \times 10^{-4}$

Уравновешенность).

Кроме того, термодинамический диаметр связан с

эквивалентным аэродинамическим диаметром частицы посредством:

$$d_{te} = d_{ae} \sqrt{\frac{\rho_0 C_c(d_{ae})}{\rho C_c(d_{te})}} \quad (2.50)$$

2.6.3 Осаждение методом диффузии

Диффузия частиц является результатом их броуновского движения, которое представляет собой случайное движение частицы в жидкости в результате ее непрерывной бомбардировки молекулами газа. Диффузионное слияние частиц представляет собой чистый перенос под влиянием градиента концентрации. Частицы перемещаются из областей с высокой концентрацией в области с низкой концентрацией. Первый закон диффузии Фика описывает броуновское движение; его можно записать в виде:

$$J = -D \nabla n \quad (2.51)$$

где J является вектором числового потока (частиц / м² s), n числовая концентрация частиц (частиц/м³) и D коэффициент диффузии (м² / s) (Дроссинос и Хусидадас, 2006).

Коэффициент диффузии частиц может быть выражен как (Хиндс, 1999):

$$D = \frac{k_B T C_c}{\pi \eta d^3} \quad (2.52)$$

является постоянной Больцмана. Уравнение 2.52 называется где $k_B = 1.381 \times 10^{-23}$ Дж/Кей⁻¹

Уравнение Стокса-Эйнштейна. Другим способом выражения коэффициента диффузии в терминах подвижности частиц является

$$D = \frac{k_B T}{6 \pi \eta r} \quad (2.53)$$

2.6.4 Осаждение ударом

Столкновение происходит, когда частицы не следуют по линиям течения жидкости из-за своей инерции, и, следовательно, сталкиваются на поверхности. Это происходит при криволинейном движении внутри человеческого тела или внутри классификатора размеров (например, каскадных ударных элементов). Параметром, который описывает отклонение траектории частицы от линий течения жидкости, является безразмерное число Стокса (Stk) определяемое как характерная скорость, умноженная на время релаксации (τ), деленное на характерную длину потока (L). Подробное описание числа Стокса представлено в работе Дроссиноса и Хусидадаса (2006).

Число Стокса может быть выражено как:

$$Stk = \frac{\rho_d^2 C_c V}{18 \mu L} \quad (2.54)$$

Для каскадного ударного элемента характерная длина определяется относительно сопла радиус. При $Stk \ll 1$ частицы идеально следуют за линиями потока жидкости, тогда как при $Stk \gg 1$, частицы движутся по прямым линиям, отклоняясь от линий течения жидкости, если они изгибаются.

2.6.5 Фортетические эффекты

Движение аэрозольных частиц зависит от внешних сил, которые действуют на них.

Наиболее часто встречающиеся внешние силы, которые влияют на подвижность частиц и, таким образом, приводят к переносу частиц, связаны с *термофорезом* и *диффузиофорезом*.

Тепловой градиент в жидкости вызывает термофоретическое воздействие на частицы аэрозоля, поскольку молекулы газа оказывают различное воздействие на частицы с более холодной и более теплой сторон. Тепловой градиент приводит к возникновению суммарной силы, которая перемещает частицы из высокотемпературной области в низкотемпературную. Поток частиц, вызванный термофоретическим воздействием, выражается как:

$$v_{ce} J_c = n \quad (2.55)$$

где n является концентрацией частиц и v_{ce} – термофоретическая скорость. Тот самый-термофоретическая скорость может быть выражена как:

$$v_{ce} = -K_{ce} \nabla T / T \quad (2.56)$$

где K_{ce} является безразмерным параметром, называемым термофоретическим коэффициентом, который зависит от свойств как газа, так и частицы (Дроссинос и Хусиадас, 2006).

Динамика аэрозолей, и, более конкретно, их осаждение при переносе в текущей жидкости, имеет большое значение в технологических приложениях, таких как аэрозольная фильтрация и приборостроение. Подробное обсуждение этих про-

2.6.6 Осаждение атмосферного аэрозоля

Осаждение аэрозоля в атмосфере является сложным процессом; следовательно, общепринятой практикой является его параметризация с использованием концепции скорости осаждения. Аэрозоли удаляются из атмосферы с помощью механизмов сухого и влажного осаждения. Скорость осаждения определяется как отношение потока осаждения указанного загрязняющего вещества (Сайнфельд и Пандис, 2006) к концентрации загрязняющего вещества (следовательно, скорость осаждения - это не что иное, как надлежащим образом определенный коэффициент массопередачи). Для определения скорости сухого осаждения можно использовать два общих подхода. В первом методе используются доступные экспериментальные данные для различных видов аэрозолей. Второй метод основан на расчете переноса материалов из атмосферы на поверхность Земли с помощью различных механизмов сопротивления; такими механизмами сопротивления являются аэродинамическое сопротивление, поверхностное сопротивление и сопротивление переносу.

Осаждение частиц зависит от размера частиц и может быть выражено следующим образом:

$$v_{di} = \frac{1}{r_a + r_{di} + r_a r_{di}} + v_{gi} \quad (2.57)$$

где член в левой части (LHS) обозначает скорость осаждения (м/с) частиц в бункере для сбора i и переменная r на RHS указано соответствующим образом выбранное сопротивление; нижний индекс a определяет аэродинамическое сопротивление (с/м), нижний индекс d сопротивление слоя осаждения (с/м) частиц в бункере по размеру i . Переменная v с нижним индексом g представляет собой гравитационную скорость осаждения частиц (м / с) в ячейке размера i .

Обзор полевых измерений, направленных на определение скорости осаждения различных видов, представлен в работе Сайнфельда и Пандиса (2006). Однако измерения сухого осаждения еще не дали полного понимания процесса сухого осаждения, поскольку проблема довольно сложная, включающая множество факторов, которые не могут быть учтены в различных полевых исследованиях. Эти неопределенности включают метеорологические условия (и, в частности, временные и пространственные характеристики атмосферной турбулентности), характеристики поверхности и свойства аэрозоля.

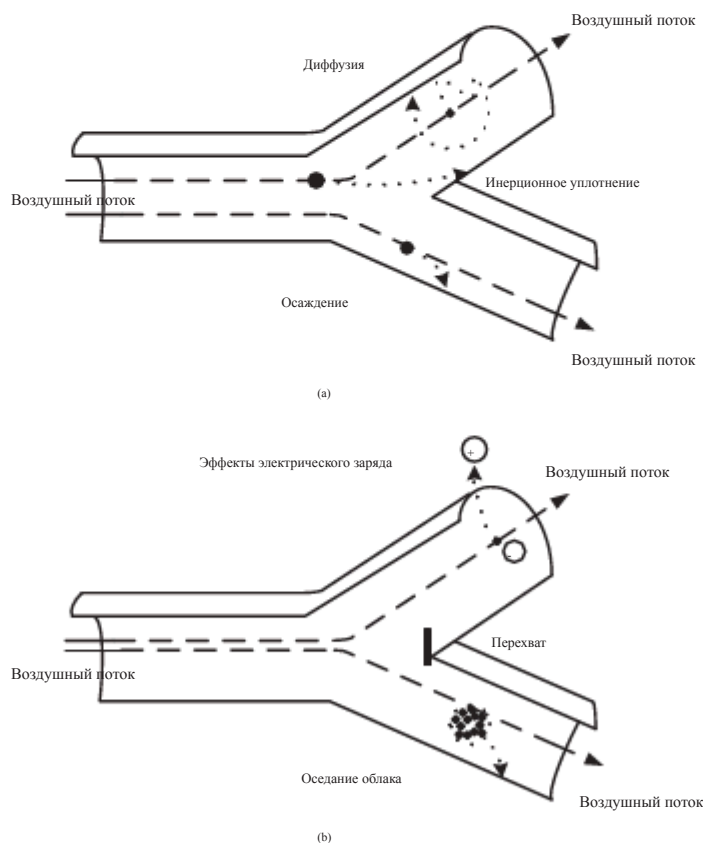
Влажная очистка также является эффективным механизмом удаления аэрозолей из атмосферы. Скорость очистки под облаками имеет приблизительное значение $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ и в облаке

объем очистки примерно в 10 раз больше. Скорость мокрого осаждения может быть выражена как произведение средней скорости продувки (Λ) и высоты по вертикали h , где предполагается равномерное распределение загрязняющих веществ между поверхностью земли и высотой. h . Подробное обсуждение характеристик влажного осаждения представлено в Finlayson Pitts and Pitts (2000).

2.6.7 Осаждение в дыхательных путях человека

Помимо определения подробной морфометрической модели дыхательной системы, для понимания отложения частиц в организме человека требуется информация о характеристиках распределения частиц по размерам. Наиболее широко используемой моделью ингаляции, в которой представлены основные аспекты дыхательной системы, является модель ICRP (Международная комиссия по радиологической защите, 1994).

Отложение частиц в РТ зависит от размера и физико-химических свойств частиц и физиологии человека. Инерционное воздействие, осаждение и броуновская диффузия являются наиболее важными механизмами осаждения в РТ (Housiadas and Lazaridis, 2010; Lazaridis, 2011) (см. Также рисунок 2.5). Кроме того, в ряде случаев важны перехват и электростатическое осаждение (Hinds, 1999). Общая осаждения частиц эффективность рассчитывается как суперпозицию независимых осаждения эффективности, вытекающие из различных механизмов осаждения.



Схематическое описание механизмов осаждения ((a) диффузия, седиментация Рисунок 2.5 и столкновение; (b) перехват и электростатика) частиц в РТ.ст. (Адаптировано по Ruzer и Harley, 2005.)

Доза частиц в каждой части РТ рассчитывается с использованием следующего выражения:

$$H = n \cdot c \cdot B_{0.4} \cdot \sum_{j} \alpha_j \cdot n_{\text{прекрасно, я}} + (1 - \sum_{j} \alpha_j) \cdot n_{\text{грубый я}} \quad (2.58)$$

где H - мощность дозы (мкГ/ч), n_0 коэффициент вдыхаемости, c_d концентрация аэрозоля в

воздух, B скорость вентиляции, α массовая доля мелкодисперсного режима, $n_{\text{отлично, i}}$ удержание мелких частиц в области легких j и n задержка крупных частиц в области легких j (Международный Комиссия по радиологической защите, 1994).

Важным фактором, определяющим эффективность всасывания, с которой аэрозоли из окружающей

среды попадают в рот и нос, является вдыхаемость (Y). Попадая частиц внутрь РТ зависит от

характеристик потока вблизи рта и носа и от размера частиц. "Вдыхаемость"

определяется как отношение массовой концентрации частиц, вдыхаемых через нос или рот

(M) для определенного размера в зависимости от массовой концентрации в окружающей среде ($M_{o, amb}$) (Хиндс, 1999;

Лазаридис, 2011):

$$Y = \frac{M}{M_{amb}} \quad (2.59)$$

Региональные профили отложений в легких обычно представлены в виде

фракций отложений (DF) в определенных функциональных отделах: области

носоглотки (экстраторакальной области, ET), трахеобронхиальной области

(ТВ) и альвеолярной области (AL) (Housi- adas and Lazaridis, 2010). Для

среднего человека, выполняющего среднюю деятельность (средние

значения параметров), отложение частиц может быть описано следующими

эмпирическими уравнениями (Хиндс, 1999): Для *внегрудочная область*:

$$DF_{ET} = Y \cdot \frac{1}{1 + \text{опыт } 6.84 + 1.183 \ln d_p} \cdot \frac{1}{1 + \text{опыт } (0.924 - 1.885 \ln d_p)} \quad (2.60)$$

где Y является ли вдыхаемость при скорости воздуха 0 м с^{-1} и d_p - диаметр частицы (мкм).

Для *трахеобронхиальной области*:

$$DF_{\text{Туберкулез}} = \frac{0.00352}{d_p^d} \cdot [\exp(-0.234(\ln d_p + 3.40)^2) + 63.9 \exp(-0.819(\ln d_p - 1.61)^2)] \quad (2.61)$$

Для *альвеолярная область*:

$$DF_{AL} = \frac{0.0155}{d_p^d} \cdot [\exp(-0.416(\ln d_p + 2.84)^2) + 19.11 \exp(-0.482(\ln d_p - 1.362)^2)] \quad (2.62)$$

Общая доля осаждения может быть выражена как сумма фракций:

$$DF = Y \cdot \frac{0.911}{1 + \text{опыт } 4.77 + 1.485 \ln d_p} + \frac{0.943}{1 + \text{опыт } (0.508 - 2.58 \ln d_p)} \quad (2.63)$$

Уравнения 2.60- 2.63 применимы для частиц диаметром от 0,001 до 100 мкм,

и результаты согласуются с прогнозами модели ICRP с отклонением $\pm 0,03\%$.

2.7 Повторное взвешивание

Повторное взвешивание частиц в результате турбулентного потока жидкости важно при взаимодействии атмосферы с различными поверхностями и во многих промышленных процессах. Существующие модели ресуспендирования частиц основаны либо на моделях силового баланса, либо на моделях энергетического баланса. В моделях с силовым балансом повторная подвеска происходит, когда аэродинамические подъемные силы становятся больше, чем силы сцепления. Модели баланса сил недооценивают скорость ресуспендирования, поскольку они пренебрегают передачей энергии от турбулентной жидкости к связанной частице (Зискинд, Фичман и Гутфингер, 1995; Лазаридис, Дроссинос и Георгопулос, 1998). В подходах с энергетическим балансом считается, что осажженная частица связана с поверхностью ангармоническим потенциалом (Рикс, Рид и Холл, 1988). При наличии турбулентного течения жидкость передает энергию частице через турбулентные вихри, и когда частица накопила достаточно энергии, чтобы вырваться из потенциальной ямы, она ресуспендируется. В этом разделе рассматривается энергобалансный подход при изучении однослойной и многослойной ресуспензии, основанный на работах Рикса, Рида и Холла (1988), Лазаридиса и Дроссиноса (1998) и Лазаридиса, Дроссиноса и Георгопулоса (1998).

2.7.1 Ресуспендирование монослоя

Скорость ресуспендирования J , скорость, с которой частица может пересечь барьер потенциальной ямы адгезива, может быть выражена в терминах высоты потенциального барьера Q и той средней потенциальной энергии частиц (U) в потенциальной яме (Лазаридис *et al.*, 1998):

$$J = \frac{\omega Q}{\pi^2 U^{\text{опыт}}} \quad (2.64)$$

является линейной функцией собственной частоты колебаний связанной частицы. где ω

Фракция частиц, которые остаются на поверхности, могут быть вычислены из кинетического уравнения первого порядка (Лазаридис *et al.*, 2008):

$$\frac{df(t)}{dt} = -Jf(t) \quad (2.65)$$

который показывает, что f уменьшается экспоненциально со временем воздействия потока.

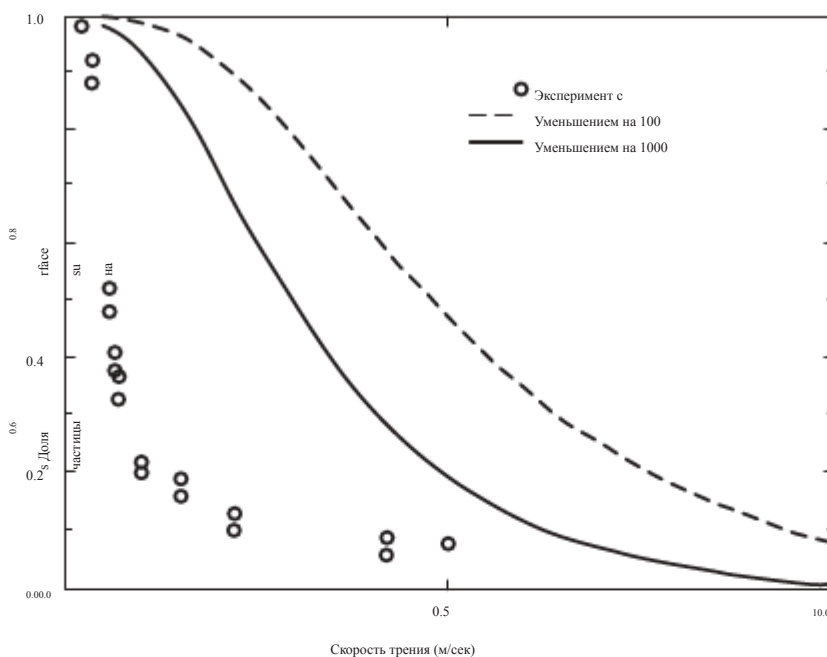
Поскольку и поверхность, и поверхности частиц являются шероховатыми, шероховатость поверхности приводит к распределению сил сцепления, которое может быть учтено путем перенормировки радиуса частицы. Определяем нормализованный радиус частицы как r^* $\equiv r/r_{\text{сф}}^{\text{опыт}}$ вероятность Дис- распределение эффективной частиц радиуса становится распределение вероятностей для r^* . Было высказано предположение (Рикс, Рид и Холл, 1988), что функция плотности вероятности адгезионных сил может быть аппроксимирована логарифмически нормальным распределением:

$$\phi(r)_{\text{доктор}} = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \sigma \ln \sigma} \exp \left\{ -\frac{1}{\sigma^2 (\ln)^2} [\ln(r/r^*)]^2 \right\} \quad (2.66)$$

где r является средним геометрическим значением r^* и σ является стандартным отклонением логарифмически нормального значения распределение.

Используя долю оставшихся частиц f , дробная скорость ресуспендирования $\Lambda(t)$ может быть выведено как (Лазаридис, Дроссинос и Георгопулос, 1998):

$$\Lambda(t) = f_R(t) = \int_0^\infty \phi(r) \exp[-J(r)t] (r)_{\text{доктор}} \quad (2.67)$$



Сравнение прогнозов модели и экспериментальных данных для 10 $\mu\text{м}$ оксид алюминия Рисунок 2.6
сферы на поверхности из нержавеющей стали с использованием средней подъемной силы Лейтона и Акривоса,
Уравнение 2.68 ($r=100$ или 1000 , $\sigma = 10.4$, $\tau = 1$ с). Адаптировано с разрешения Лазаридиса,
Дроссинос и Георгопулос (1998). Авторское право © 1998, Elsevier Ltd.

Для средней подъемной силы, ответственной за реанимацию частиц, могут быть использованы различные выражения. Среди других выражений для средней подъемной силы, выведенных Лейтоном и Акривосом (1985) для сферы, опирающейся на плоскую поверхность при ограниченном стенкой сдвиге, является:

$$\left\langle \frac{1}{L} \right\rangle F_{\text{L}} = 9.22 \left(\frac{\tau}{\rho} \right)^{4/3} \quad (2.68)$$

Модель ресуспендирования с энергетическим балансом была применена для расчета скорости ресуспендирования частиц оксида алюминия с поверхностей из нержавеющей стали. Энергетический спектр турбулентного потока - одномерное преобразование Фурье тензора автокорреляции скорости, - используемое в расчетах, было взято из Hall (1994). Сравнение с экспериментальными данными показано на рисунке 2.6; видно, что модель недооценивает скорость ресуспендирования. Требуется дополнительные исследования для определения влияния шероховатости поверхности и силы сопротивления на повторное взвешивание отдельных частиц с целью более точного моделирования экспериментальных данных.

2.7.2 Многослойная Ресуспензия

Ресуспендирование частиц из многослойного осадка, вызванное турбулентным потоком, также является важным процессом. Скорость ресуспендирования может быть определена путем решения набора связанных кинетических уравнений первого порядка (Лазаридис и Дроссинос, 1998).

В настоящее время существуют две модели многослойной ресуспензии: одна предложена Лазаридисом и Дроссиносом (LD; Лазаридис и Дроссинос, 1998) и одна предложена Фриссом и Ядигароглу (FY; Friess and Yadiragolu, 2001). Обе модели предполагают идеализированное описание

о месторождении. Считается, что многослойное месторождение состоит из n слоев, каждый из которых имеет $N_j(t)$ не взаимодействующие частицы (индекс j обозначает слой частиц; $j = 1$ относится к первому, верхний, слой). Предполагается, что частицы идентичны, недеформируемые сферические частицы. Рассматриваются только межслойные взаимодействия; внутрислойными взаимодействиями пренебрегают. Частицы укладываются одна на другую. Первоначально все участки решетки заняты таким образом, чтобы количество частиц на слой было постоянным и равным N_0 . Разница между этими двумя моделями заключается в том, что в модели LD лучше всего оценить скорость ресуспендирувания отдельных частиц J независимо от номера слоя. Соответственно, две модели описывают скорость изменения N_j Автор:

$$\frac{dN_j}{dt} = -1 - \frac{N_{j-1}(t)}{N_0} JH \quad \text{для } j \geq 2 \text{ (LD)} \quad (2.69)$$

$$\frac{dN_j}{dt} = -1 - \frac{(j)N_{j-1}}{N_j(t)} JN \quad \text{для } j \geq 2 \text{ (FY)} \quad (2.70)$$

Обе модели выражают скорость изменения количества частиц в j -й слой как произведение количества частиц в этом слое, $N_j(t)$, умноженный на скорость ресуспензии на единицу J умножает долю частиц, подвергшихся воздействию (турбулентного потока). Модели различаются тем, как рассчитывается доля подвергшихся воздействию частиц. Я утверждаю, что скорость изменения $N_j(t)$ определяется исключительно по доле частиц, ресуспендированных (отсутствующих или с отверстиями) из $(j-1)$ -го слоя; это означает, что всякий раз, когда частица удаляется из верхнего слоя, частица приведенный ниже параметр немедленно ресуспендируется (верхний индекс 0 относится к начальному количеству частиц в данном слое). Следовательно, модель справедлива для больших скоростей ресуспендирувания или, что эквивалентно, дает максимальную скорость многослойного ресуспендирувания. FY, с другой стороны, утверждают, что скорость повторного суспендирувания зависит от относительной разницы между количеством частиц в $(j-1)$ -й слой и j -й слой. Таким образом, модель FY является более общей и обеспечивает соответствующее описание типовой ресуспензии из многослойного осадка.

Интересной и отличительной особенностью модели LD является то, что скорость ресуспендирувания отдельных частиц может варьироваться в зависимости от положения частиц в осадке: считается, что она зависит от слоя. Система связанных кинетических уравнений первого порядка, описывающая скорость изменения количества частиц в j -таком образом, этот слой может быть выражен как:

$$\frac{dN_j}{dt} = -1 - \frac{N_{j-1}(t)}{N_0} JN_j \quad \text{для } j \geq 2 \quad (2.71)$$

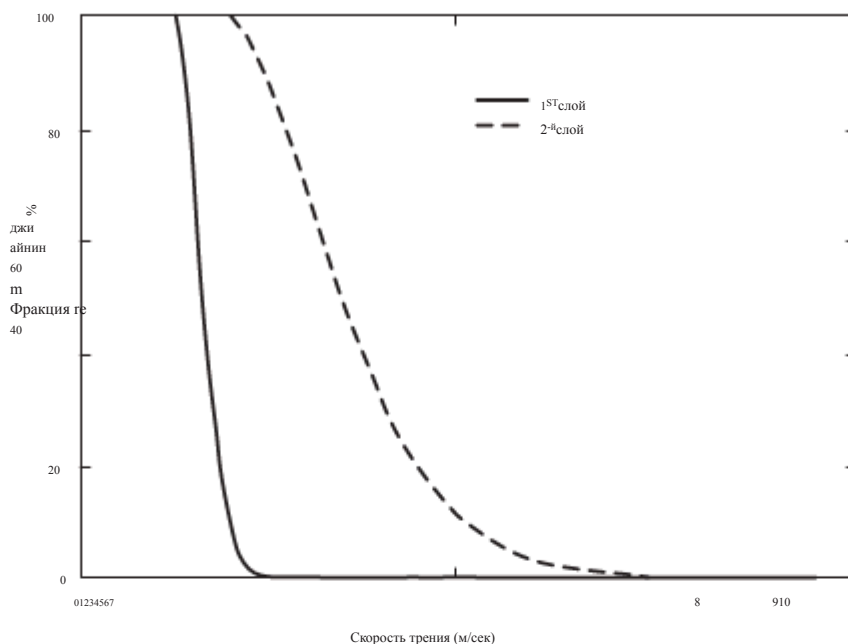
где верхний индекс 0 обозначает начальное количество частиц в данном слое.

Кинетическое уравнение для первого слоя можно записать в виде:

$$\frac{dN_1}{dt} = -J_1 N_1 \quad (2.72)$$

Решение этого набора уравнений дает скорость ресуспендирувания на разных слоях. Лазаридис и Дроссинос (1998) показали, что при геометрическом расположении осажденных частиц с координационным числом 2 (частицы, уложенные друг на друга) частицы из верхних слоев ресуспендируются с более низкими скоростями трения, чем частицы, прилегающие к поверхности.

Результаты моделирования двухслойного осаждения SnO_2 частицы радиусом 10 мкм показаны на рисунке 2.7 в зависимости от скорости трения. Частицы верхнего слоя отделяются быстрее, чем частицы в аэрозоле.



Процент SnO_2 частицы, остающиеся на поверхности из нержавеющей стали в результате трения **Рисунок 2.7** скорость для двухслойного покрытия ($\tau_0 10 \text{ м}$, $\tau = 1 \text{ с}$). Адаптировано с разрешения Лазаридиса и Дроссиноса (1998). Авторское право © 1998, Тейлор и Фрэнсис.

слоями ниже (и, в частности, во втором слое). Результаты Лазаридиса и Дроссиноса (1998) предполагают, что доля частиц, остающихся в данном слое, распадается алгебраически со временем из-за ресуспендирования, вызванного турбулентным потоком.

Ссылки

- Becker, R. and Döring, W. (1935) Kinetische behandlung der keimbildung übersättigten dampfen. *Annalen der Physik (Leipzig)*, **24**, 719.
- Колбек, И. (1998) Введение в науку об аэрозолях, в книге *Физические и химические свойства аэрозолей* (ред. И. Колбек), Blackie Academic & Professional
- и Charman & Hall, Лондон. Колбек, И. и Лазаридис, М. (2010) Аэрозоли и загрязнение окружающей среды. *Naturwissenschaften*, **97**, 117-131.
- Дебенедетти, П.Г. (1996) *Метастабильные жидкости: концепции и принципы*, Принстон Издательство университета, Принстон, Нью-Джерси.
- Дроссинос, Ю. и Хусиас, С. (2006). Потоки аэрозоля. В *Справочнике по многофазным потокам*, (ред. К.Т. Краун), CRC Press, Бока-Ратон, Флорида, стр. 6-1-6-58.
- Финлейсон Питтс, Б.Дж. и Питтс, Дж.Н. (2000) *Химия верхних и нижних слоев атмосферы*, Academic Press, Сан-Диего, Калифорния.
- Форрест С.Р. и Виттен Т.А. (1979) Дальнейшие корреляции в скоплении частиц дыма. *Физический журнал А: Математический и общий*, **12**, L109 - L117.
- Фридендер, С. К. (2000) *Дым, пыль и дымка: основы динамики аэрозолей*, 2-е edn, издательство Оксфордского университета, Нью-Йорк.

- Фрисс Х. и Ядигароглу Г. (2001) Общая модель для ресуспендирования многослойных
отложения аэрозоля в результате турбулентного потока. *Ядерная наука и инженерия*, **138**,
161 - 176. Fuchs, N.A. (1964) *Механика аэрозолей*, Издание в Дувре, Нью-Йорк.
- Гихаскель Б., Ван Х., Джиллиленд Д. и Дроссинос Ю. (2011) Эффект частиц
влияние химического состава на вероятность активации в *n*-счетчики
частиц конденсата бутанола. *Научный журнал по аэрозолям.*, **42**, 20-37.
- Холл Д. (1994) Отчет по ядерной энергетике RPTG / P (93) 11. Хейнсон
В.Р., Соренсен К.М. и Чакрабартти А. (2012) Описание трех параметров
о структуре фрактальных агрегатов кластеров с ограниченной диффузией. *Журнал
по коллоидам и науке о границах раздела*, **375**, 65-69.
- Хиндс, У.К. (1999) *Технология аэрозолей*, Wiley-Inter Science, Нью-Йорк. Хусинадас,
С. и Лазаридис, М. (2010) Моделирование дозиметрии при вдыхании, в *Книге
Воздействие загрязняющих веществ на человека* (ред. М. Лазаридис
через кожу и дыхание и И. Колбек), Спрингер.
- Международная комиссия по радиологической защите (1994) *Дыхательные пути человека
Модель радиологической защиты*, *Анналы МКРЗ*, Вып. **24** (4), Публикация МКРЗ
66, Пергам, Оксфорд, стр. 482 стр.
- Изелла Л. и Дроссинос Ю. (2011) О коэффициенте трения прямоцепочечных агрегатов.
Журнал науки о коллоидах и интерфейсах, **356**, 505-512.
- Кеврекидис, П.Г., Лазаридис, М., Дроссинос, Ю. и Георгопулос, П.Г. (1999) Единый
Кинетический подход к бинарному зарождению. *Журнал химической физики*, **111**, 8010-8012.
- Кирквуд, Дж. Дж. и Райзман, Дж. (1948) Собственные вязкости и константы диффузии
гибкие макромолекулы в растворе. *Журнал химической физики.*, **16**, 565-573.
- Kulmala, M., Vehkamäki, H., Petäjä, T. et al. (2004) Формирование и темпы роста ультра-
мелкие атмосферные частицы: обзор наблюдений. *Научный журнал по аэрозолям.*, **35**,
143-176. Лангер,
Дж.С. (1969) Статистическая теория распада метастабильных состояний. *Анналы физики.*,
54, 258- 275.
- Латтуада М., Ву Х. и Морбиделли М. (2003а) Гидродинамический радиус фрактальных кластеров.
Журнал науки о коллоидах и интерфейсах, **368**, 96 - 105.
- Латтуада М., Ву Х. и Морбиделли М. (2003b) Простая модель структуры фрактальных
агрегаты. *Журнал науки о коллоидах и интерфейсах*, **368**, 106-120.
- Лазаридис, М. (2011) *Первые принципы метеорологии и загрязнения воздуха*, Спрингер, Дор-
дrecht.
- Лазаридис М. и Дроссинос Ю. (1997) Флуктуации энергии в установившемся двойном ядре-
ация. *Журнал физики А: Математический и общий*, **30**, 3847.
- Лазаридис, М. и в комплексе drossinos, Ю. В. (1998) прокладка повторному образованию мелких частиц на Тур-
поток Бюлент. *Аэрозоль науки и техники*, **28**, 548- 560.
- Лазаридис М., Дроссинос Ю. и Георгопулос П.Г. (1998) Турбулентная ресуспензия
мелких недеформируемых частиц. *Журнал науки о коллоидах и границах раздела*, **204**, 24-32.
- Лазаридис М., Дзумбова Л., Копанакис И. et al. (2008) Премьер-министр₁₀ и ПМ_{2.5}
Восточном Средиземноморье (исследовательская станция Акротири, Крит, Греция). *Загрязнение
воды, воздуха и почвы*, **189**, 85 - 101.
- Лазаридис М., Кулмала М. и Лааксонен А. (1991) Бинарное гетерогенное образование зародышей
системы вода-серная кислота: эффект взаимодействия гидратов. *Научный
журнал по аэрозолям*, **22**, 823- 830.

- Лейтон Д. и Акривос А. (1985) Подъемная сила на небольшой сфере, касающейся плоскости, при наличии простого сдвигового течения. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik*, **36**, 174-178.
- Мелас, А.Д., Иселла, Л., Констандопулос, А.Г. и Дроссинос, Ю. (2013) Морфология и подвижность синтетических коллоидных агрегатов, *Журнал науки о коллоидах и интерфейсах* (в печати).
- Рикс, М. В., Рид, Дж. и Холл, Д. (1988) О ресуспендировании мелких частиц с помощью турбулентного потока. *Журнал физики D: Прикладная физика*, **21**, 574.
- Рузер, Л.С. и Харли, Н.Х. (2005) *Справочник по аэрозолям: измерение, дозиметрия и Воздействие на здоровье* (ред.), CRC Press, Бока-Ратон, Флорида.
- Сайнфелд, Дж.Х. и Пандис, С.Н. (2006) *Химия и физика атмосферы: от загрязнения воздуха-от загрязнения до изменения климата*, 2-е изд., John Wiley & Sons, Inc., Хобокен, Нью-Джерси.
- Smoluchowski, M. (1916) Drei vorträge über diffusion, Brownsche molekularebewegung und koagulation von kolloidteilchen. *Physik Zeits*, **17**, 557.
- Соренсен, К.М. (2011) Подвижность фрактальных агрегатов: обзор. *Наука об аэрозолях и ТЕХНОЛОГИЯ*, **45**, 755 - 769.
- Стауффер, Д. (1976) Кинетическая теория двухкомпонентной ("гетеромолекулярной") нуклеации и конденсации. *Научный журнал по аэрозолям*, **7**(4), 319 - 333.
- Thajudeen, т. Гопалакришнан, Р. Хоган, Дж. младший (2012) скорость столкновения номера-сферических частиц и агрегатов для всех диффузионных числах Кнудсена. *Наука об аэрозолях и технология*, **46**, 1174 -1186. Уильямс,
- М.М.Р. и Лоялка, С.К. (1991) *Наука об аэрозолях: теория и практика: C Специальные приложения для атомной промышленности*, Пергам, Оксфорд.
- Ву, М.К. и Фридлендер, С.К. (1993) Обратите внимание на степенное уравнение для фракталоподобных аэрозольных агломератов. *Научный журнал по аэрозолям*, **159**, 246 - 248.
- Зельдович, Ю. Б. (1942) о теории образования новой фазы: кавитация. *Журнал экспериментальных и теоретической физики*, **12**, 525. (Переведено в Ostriker, J.P., Barenblatt, G.I. 12 и Сунаев Р.А. (ред.) (1992) *Избранные труды Якова Борисовича Зельдовича*, Химическая Физика и гидродинамика, Вып. 1, Издательство Принстонского университета, Принстон, стр. 120.) Зискинд Г., Фичман М. и Гутфингер С. (1995) Ресуспендирование твердых частиц из сталкивается с турбулентными потоками -обзор и анализ. *Научный журнал по аэрозолям*, **26**, 613.

Рекомендации по аэрозоля

Отбор проб

Alfred Wiedensohler¹, Wolfram Birmili¹, Жан-Филипп Путо², и Джон Огрен³

¹ *Институт тропосферных исследований имени Лейбница, Германия*

² *Европейская Комиссия, Объединенный исследовательский центр, Италия*

³ *NOAA ESRL GMD, США*

3.1 Введение

Атмосферные аэрозоли измеряются во многих частях земного шара с целью оценки их различного воздействия на климат, видимость и здоровье человека. Термин "Твердые частицы" (ТЧ) также может использоваться для описания фазы атмосферных твердых частиц. Атмосферные частицы могут иметь различный диаметр от 1 нм до 100 мкм. В пределах этого диапазона распределение атмосферных частиц по размерам обычно считается непрерывной функцией. Наиболее важные подразделы касаются мелких частиц (< 1 мкм) и крупные частицы (> 1 мкм). Мелкие частицы возникают в основном в результате преобразования газа в частицы и сгорания, в то время как крупные частицы обычно являются результатом истирания или повторного взвешивания. Диапазон мелких частиц может быть дополнительно разделен на режимы накопления (0,1 - 1,0 мкм), режима Айткена (20-100 нм) и режима нуклеации (1-20 нм). Широко используемым условным обозначением являются "ультрадисперсные частицы" для диапазона размеров менее 100 нм. Частицы массовой концентрации определяются, как правило, для Неко-Тейн аэродинамические диапазонов размеров (ПМ₁₀, ПМ_{10-2.5}, ПМ_{2.5}), имитирующие разную глубину залегания частиц проникновение в дыхательные пути человека. Химический состав аэрозольных частиц может сильно зависеть от их происхождения и, следовательно, от их размера. В атмосфере частицы могут проявлять значительные пространственные и временные вариации. Это может вызвать проблемы, например, при определении репрезентативных точек отсечения выборки для сетей наблюдений.

Аэрозольные частицы имеют различное время пребывания в атмосфере в зависимости от скорости их осаждения, которая, опять же, зависит от размера..... Частицы, находящиеся на крайних концах распределения частиц по размерам, страдают от потерь при коагуляции (ультрадисперсные частицы), а также от осаждения и потерь при ударе (крупные частицы). Частицы в режиме накопления являются наиболее долговечными по отношению к атмосферным осадкам, и они также являются наиболее инертной фракцией во время отбора проб частиц. Из-за их высокой количественной концентрации и эффективного взаимодействия с видимым солнечным излучением частицы режима накопления играют наиболее важную роль в радиационных эффектах аэрозоля, которые включают рассеяние света, поглощение света и прямое воздействие излучения. Только в регионах, которые особенно подвержены воздействию морских брызг или источников минеральной пыли, крупные частицы могут доминировать в общей массовой концентрации частиц и рассеянии света. Для здоровья человека наиболее важной фракцией считаются мелкие и ультрадисперсные аэрозольные частицы. Эти частицы могут проникать глубоко в легкие и вызывать респираторные и сердечно-сосудистые заболевания.

3.2 Рекомендации по Стандартизированному Отбору проб Аэрозолей

3.2.1 Общие рекомендации

При практическом отборе проб аэрозоля следует избегать каких-либо артефактов, вызванных изменением погоды или условий окружающей среды и / или изменениями внутри зданий или контейнерных лабораторий, из которых отбираются пробы частиц. Рекомендации по стандартизации измерений аэрозоля, независимо от типа места наблюдения и местного климата, были выпущены, например, BMO-GAW (Всемирная метеорологическая организация - Global Atmosphere Watch), ЕМЕП (Европейская программа мониторинга и оценки) и европейскими исследовательскими инфраструктурными программами (EUSAAR - Европейские суперсайты по исследованию атмосферных аэрозолей и ACTRIS - Сеть инфраструктуры исследований аэрозолей, облаков и остаточных газов). Хотя отдельные рекомендации могут быть очень подробными в отношении, например, конфигурации входа аэрозоля и этапов кондиционирования при особых условиях окружающей среды, более широкая система стандартизации обычно считается достаточно общей, чтобы удовлетворить требования широкого спектра существующих научных подходов и подходов к мониторингу. На практике, измерения аэрозоля могут быть разделены на краткосрочные измерения для изучения процессов и непрерывные долгосрочные наблюдения, используемые для получения сезонных и десятилетних тенденций регионального климата или здоровья человека. Однако получение данных об аэрозолях определенного и сопоставимого качества должно быть приоритетом для обоих видов деятельности.

Идеальная система отбора проб аэрозолей обеспечивает беспрепятственный поток проб из окружающей среды прямо к приборам, удаляя при этом некоторые нежелательные компоненты воздуха, такие как гидрометеоры или избыточная влага. Идеальная система отбора проб:

- исключает попадание капель осадков и тумана в отобранный аэрозоль,
- обеспечивает получение репрезентативной пробы аэрозоля из окружающей среды с минимальными диффузионными и инерционными потерями

насколько это возможно,

- содержит аэрозольные частицы при низкой относительной влажности (RH) ($<40\%$),
- и • сводит к минимуму испарение летучих твердых частиц.

Наиболее распространенные установки сочетают в себе наружный аэрозольный патрубок, гладкие транспортирующие трубы, кондиционер для аэрозоля для осушения потока отбора проб и конечный разделитель потока для распределения аэрозоля

среди различных инструментов и сэмплеров. Аэрозольные приборы, как правило, должны размещаться

о

в помещении, обеспечивающем чистоту лабораторных условий и температуру

от 15 до 30°C . Оптимальная температура в помещении составляет от 20 до 25°C . 3.2.2

Стандартизация входных

отверстий для ~~проб~~ *аэрозоля* ~~размеры~~

Предельный размер входного отверстия для аэрозоля и высота над землей обычно определяются назначением измерительной сети. В настоящее время наиболее широко используются варианты РМ₁₀, РМ_{2,5} и РМ₁, подразумевающий верхние аэродинамические диаметры отсечки на уровне 10, 2,5 и 1 мкм в условиях окружающей среды. Эти впускные устройства основаны на разделении частиц либо ударным устройством, либо циклоном.

10

Сети наблюдений, такие как WMO-GAW, рекомендовали верхнюю точку среза 10 мкм при окружающих условиях (WMO, 2003). Обоснование заключается в том, что частицы размером более 10 мкм, как правило, имеют местное происхождение и, таким образом, не являются репрезентативными для аэрозоля регионального масштаба и его воздействия на климатические эффекты. Напротив, приемники общего количества взвешенных веществ (TSM) оказываются чувствительными к скорости ветра и не могут обеспечить репрезентативные выборки более крупных частиц. Для получения дополнительной информации о размерах ВМО-ГСА рекомендует использовать аэродинамические разрезы размером 2,5 мкм (условия окружающей среды) и 1 мкм (сухие условия), чтобы различать мелкие и крупнозернистые частицы. Рекомендации, содержащиеся в Отчете ВМО-ГСА №153 (ВМО, 2003 г.), также были приняты ЕМЕП и европейскими инфраструктурными проектами EUSAAR и ACTRIS.

Для отбора проб аэрозоля, связанного со здоровьем, РМ₁₀ и РМ_{2,5} являются юридическими критериями, используемыми для отбора проб массовых концентраций твердых частиц в государственных сетях мониторинга (ЕС, 1999), хотя количество ультрадисперсных частиц или концентрация сажи были рекомендованы в качестве дополнительного показателя, имеющего отношение к здоровью. Для обоснования критериев отбора проб для измерения аэрозоля, связанного со здоровьем, и будущих перспектив см. Vincent (2005).

3.2.2.2 Воздухозаборник целиком для экстремальных условий окружающей среды

Для измерений в экстремальных климатических условиях могут быть рассмотрены альтернативные конструкции воздухозаборников. В местах отбора проб, где часто наблюдается облачность или замерзание, может быть предпочтительнее использовать нагретый воздухозаборник для подачи всего воздуха для улавливания капель облаков и тумана внутри образца. Этот вход относится к участкам, расположенным в полярных регионах или на высоких альпийских горах. Рисунок 3.1 иллюстрирует концепцию такого воздухозаборника с подогревом всего воздуха, основанную на конструкции воздухозаборника станции Юнгфрау-йох в Швейцарии, как описано в работе Вайнгартнера, Ньюки и Балтенспергера (1999). Нагрев предотвращает засорение впускного отверстия льдом. Внутри входного отверстия происходит испарение капель облаков и тумана, так что все частицы аэрозоля, независимо от того, активированы они или нет, будут учитываться при измерении. Для таких воздухозаборников, предназначенных для подачи цельного воздуха, желательно тщательно изучить взаимосвязь между скоростью окружающего ветра и изменениями характеристик срезаемого материала. 3.2.2.3 Трубки и разделители потока

Внутри измерительной станции поток аэрозоля обычно распределяется между несколькими приборами. В случае аэрозольных частиц следует внимательно относиться к выбору трубки и

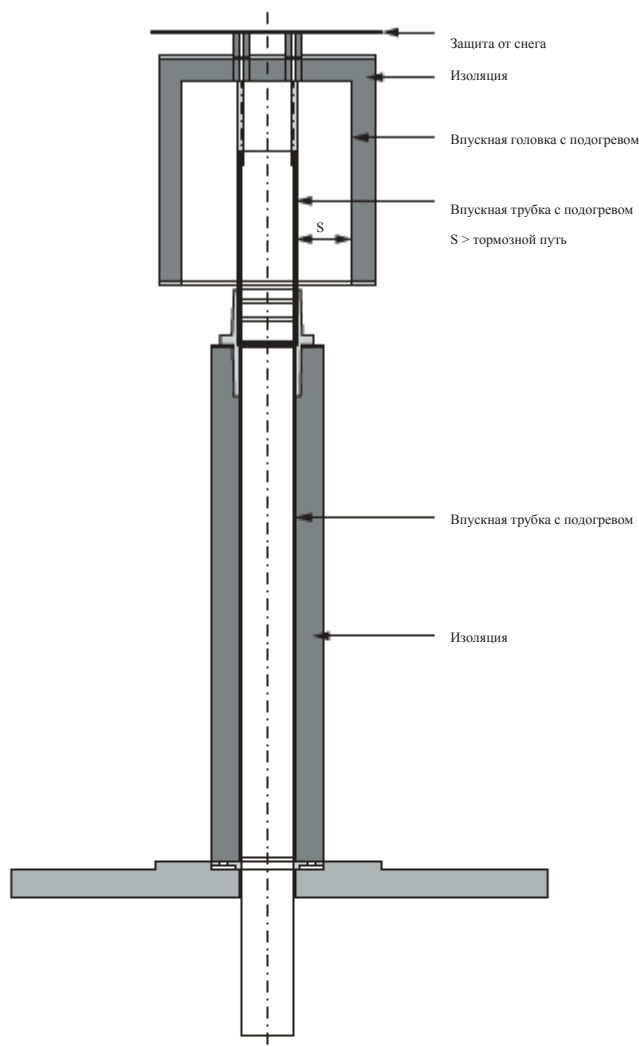


Рисунок 3.1 *Схема впуска всего нагретого воздуха.*

конструкция расходораспределительных устройств. Трубы для отвода аэрозоля должны быть изготовлены из металла, предпочтительно нержавеющей стали. Для отбора проб частиц крайне важно, чтобы трубки были из проводящего материала и электрически заземлены. В противном случае статические заряды могут удалить значительную часть аэрозоля, подлежащего отбору проб. Короткие отрезки трубок можно заменить проводящими силиконовыми трубками, которые одновременно являются эластичными и проводящими. Идеальная установка впускного отверстия также позволяет, насколько это возможно, избежать источников турбулентности (изгибов, соединителей) (поскольку турбулентность увеличивает потери частиц из-за диффузии) и сделать пробоотборные трубопроводы как можно короче.

На рисунке 3.2 показан разработанный на заказ изокINETический разделитель потока, в котором скорость потока пробы почти равна скорости основного потока. Ключевой особенностью разделителя является то, что проба удаляется из сердцевины основного потока аэрозоля, а не из линий тока вблизи стенки магистральной трубы. Этот принцип обеспечивает репрезентативный отбор проб, особенно для крупных частиц и наночастиц.

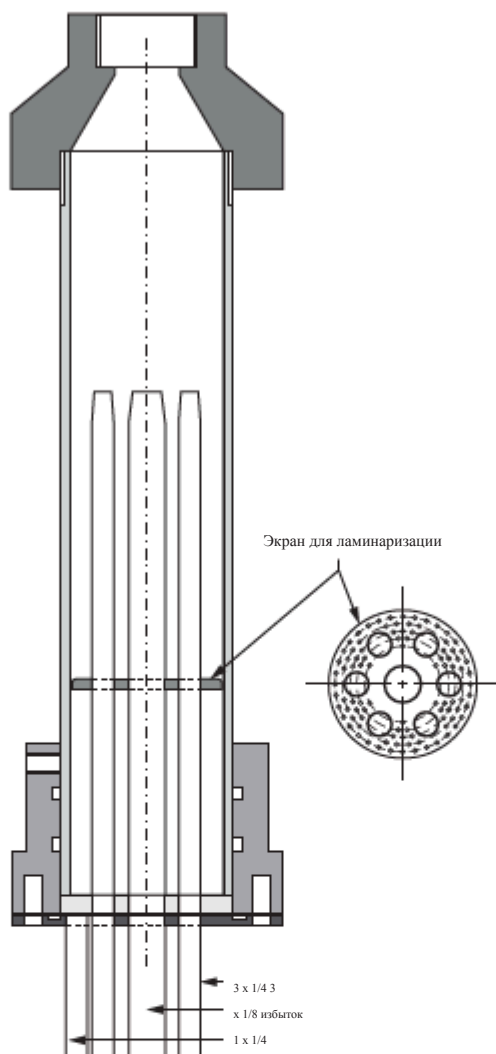


Рисунок 3.2 Эскиз изокINETического разделителя потока.

3.2.3 Контроль влажности

Одной из особых проблем летом или в теплой и влажной атмосфере является высокая температура воздуха, равная точке росы. Если эта точка росы превышает 20-25 °C, как в тропических или субтропических регионах, в линиях отбора проб аэрозоля может конденсироваться вода или гидрофильные частицы могут значительно увеличиться в размерах и изменить свои свойства. Философия долгосрочных сетей наблюдений (BMO-GAW, EMEP, EUSAAR, ACTRIS), следовательно, заключается в ограничении относительной влажности в аэрозольных приборах максимум 40% при определении физических и оптических свойств. При относительной влажности ниже 40% гигроскопический рост ограничен и обычно вызывает изменение диаметра частиц менее чем на 10% по сравнению с таковым в сухих условиях.

3.2.3.1 Температура точки росы окружающей среды

Выбор мер по осушению пробы аэрозоля в месте наблюдения зависит от разницы между максимальной температурой точки росы окружающей среды и

температура, при которой обычно выполняется измерение. *In situ* физические и оптические измерения аэрозоля предпочтительно проводить в лаборатории с кондиционированным воздухом по адресу

около 23 ± 2 °С. Предполагая, что температура в помещении составляет 21 °С,

могут быть приняты следующие решения:

Температура точки росы в окружающей среде ниже 7 °С: Сушка не требуется, поскольку относительная влажность в

линиях отбора проб при комнатной температуре всегда будет ниже 40%. Разница температур

в 14 К между внутренней и наружной средой достаточно снизит относительную влажность. Если температура окружающей среды и относительная влажность составляют 7 °С и 100%, например, при

точка росы 7 °С, то относительная влажность аэрозоля при комнатной температуре 21 °С

составит 40%.

Температура точки росы окружающей среды от 7 до 21 °С: В этом диапазоне поток аэрозоля

должен быть высушен по крайней мере перед каждым прибором, поскольку относительная влажность может превышать 40% в

линиях отбора проб при комнатной температуре. Если температура окружающей среды и относительная влажность составляют 25 °С

и 73%, например, при точке росы 20 °С, тогда относительная влажность аэрозоля при комнатной

температуре составит 93%, при этом в трубках для отбора проб не образуется конденсат.

Температура точки росы окружающей среды выше 21 °С: В этом случае относительная влажность всегда будет превышать 100%

в линиях отбора проб при комнатной температуре 21 °С. В худшем случае это приведет к

скоплению влаги в линиях отбора проб и может даже повредить приборы. Поэтому перед поступлением

в помещение необходимо высушить основной поток аэрозоля, поступающий на вход. Если

Амби- ЛОР температуры и влажности с 30 ° и 65%, например, на температуры точки росы

при температуре 23 °С относительная влажность теоретически составит 108% при комнатной температуре,

так что произойдет конденсация.

3.2.3.2 Технология сушки

Мы представляем четыре метода кондиционирования потока пробы аэрозоля до относительной влажности

ниже 40%. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Выбор может зависеть от требований

программы измерений и/или технических средств на месте наблюдения.

Мембранные сушилки. Мембранные осушители представляют собой эластичные трубки на основе

паропроницаемого политетрафторэтилена (PTFE). К коммерчески доступным мембранам относятся Nafion[®] и

Гор-Текс[®]

трубки. Нафлон представляет собой сульфированный тетрафторэтилен, который работает как

проницаемая мембрана, в которой транспортируются молекулы водяного пара. Gore-Tex представляет

собой пористую фторопластовую мембрану с примерно миллиардом пор на квадратный сантиметр.

Небольшой размер пор позволяет проходить молекулам водяного пара. Жидкая вода, однако, не может проникать

через мембрану из-за гидрофобной природы. В обоих типах, перенос водяного пара осуществляется

за счет градиента его парциального давления через мембрану трубки. Поток воздуха, подлежащий осушке

внутри трубки, достигнет равновесной относительной влажности, если время выдержки будет достаточно

длительным. Конечная относительная влажность воздушного потока ограничена температурой точки росы

окружающего продувочного газа. Чтобы воздушный поток был достаточно сухим, температура точки росы

температура продувочного газа должна быть ниже -20 °С. На практике для осушения воздушных потоков

в продаже имеются только осушители Nafion[®]. Эти сушилки состоят либо из одной трубки Nafion, либо

из пучка до 100 отдельных трубок. В то время как однотрубные сушилки могут быть рекомендованы для

сушки аэрозольных потоков со скоростью примерно 1 л/мин, пучковые сушилки следует использовать

с осторожностью. Общий расход, используемый в пучковой сушилке, может быть выше, но расход

ограничен перепадом давления. Кроме того, необходимо учитывать потери частиц из-за диффузии.

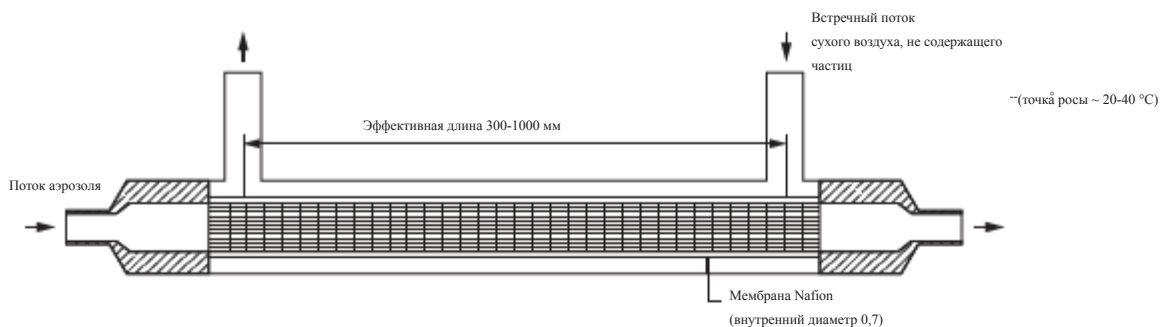


Схема аэрозольного осушителя с низкими потерями частиц на основе мембраны Nafion **Рисунок 3.3** с внутренним диаметром 0,7 дюйма (17,78 мм).

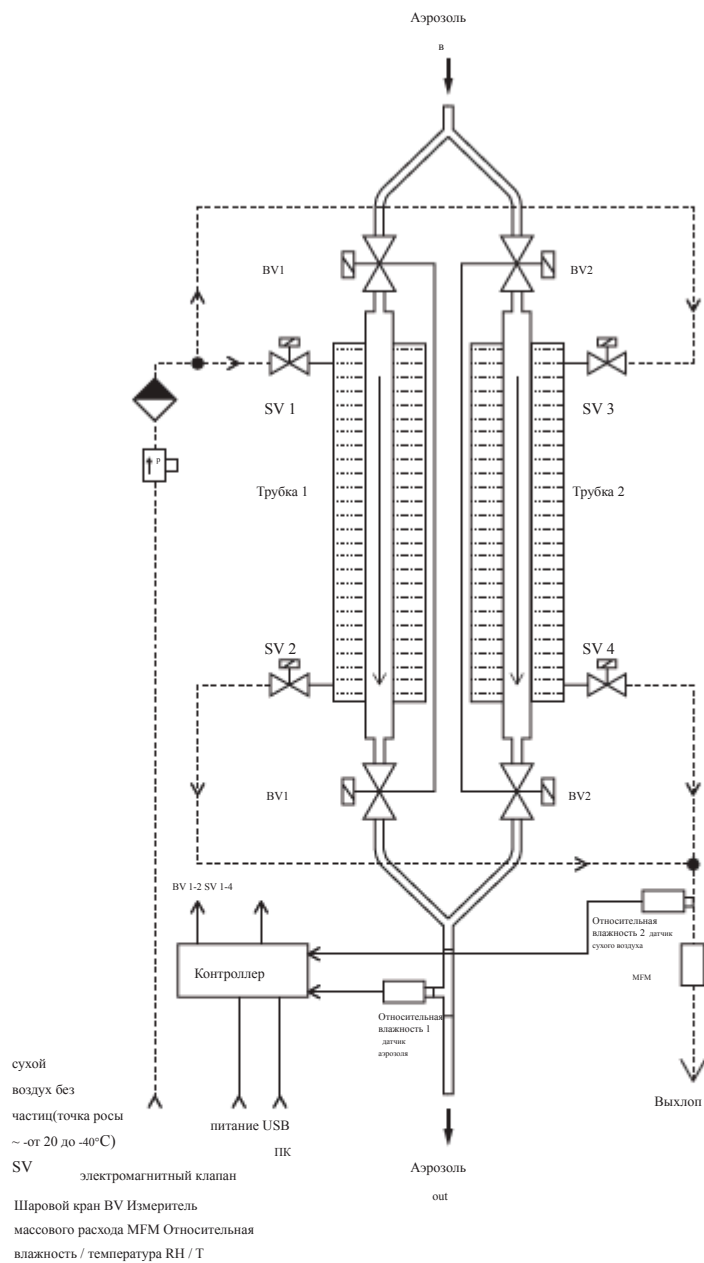
По своей конструкции сушилка bundle Nafion действует как диффузионная батарея, поэтому потери частиц размером менее 0,05 мкм значительны. Кроме того, вход в пучковую сушилку действует как ударный элемент для крупных частиц размером более 1 мкм. Таким образом, пучковые сушилки Nafion могут быть рекомендованы только для диапазона размеров частиц 0,05 - 1,0 мкм.

В качестве альтернативы можно рассмотреть сушилки Nafion, разработанные по индивидуальному заказу. Рисунок 3.3 иллюстрирует конструкцию однотрубной сушилки Nafion с минимальным перепадом давления и потерями частиц. Здесь используется трубка Nafion с внутренним диаметром 12 мм. Перепад давления и потери частиц в этом устройстве очень низкие.

Преимущество сушилки Nafion в том, что она не требует регулярного технического обслуживания. Мембрана требует замены только тогда, когда эффективность сушки падает. Недостатком является то, что на месте измерения необходимо обеспечить доступ продувочного воздуха с температурой точки росы ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это требует дополнительных затрат на внешнюю систему подачи сжатого воздуха, включая адсорбционный осушитель и фильтры.

Диффузионные осушители. Диффузионные осушители широко используются и доступны как в коммерческих, так и в изготовленных на заказ конструкциях. Принцип заключается в том, что экран из нержавеющей стали образует аэрозольную трубку и окружен шариками из силикагеля. Когда аэрозоль проходит через металлическую сетчатую трубку, водяной пар адсорбируется кремнеземом. Преимуществом аэрозольной диффузионной сушилки является ее недорогая конструкция и использование. Однако диоксид кремния необходимо заменить и / или регенерировать, как только он пропитается водой. Скорость потока аэрозоля через диффузионный осушитель обычно может составлять порядка нескольких литров в минуту. Чем выше скорость потока, тем чаще требуется замена диоксида кремния. Таким образом, основным недостатком диффузионной сушилки является ее трудоемкое использование, особенно в средах с высокими температурами точки росы. Другим недостатком являются повышенные потери в результате диффузии. Эквивалентная длина, необходимая для расчета потерь при диффузии, намного больше фактической длины (Виденсолер *et al.*, 2012).

Автоматическая диффузионная сушилка для длительной работы во влажной среде показана на рисунке 3.4. Вся сушилка размещена в шкафу и может быть размещена на крыше измерительной лаборатории или контейнера. Аэрозоль поступает в камеру и подается в одну из двух параллельных колонн из нержавеющей стали с внутренним диаметром 70 мм и общей длиной 800 мм. Каждая из этих колонн имеет одну или несколько сетчатых трубок из нержавеющей стали, окруженных силикагелем. Первая колонна используется для аэрозольной сушки, в то время как вторая регенерируется при давлении окружающей среды сухим воздухом с низкой температурой точки росы, предпочтительно ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Эскиз регенеративной диффузионной сушилки на основе кремнезема. Воспроизведено по Tsch et al. Рисунок 3.4 (2009) с разрешения Copernicus Publications.

Во время регенерации сухой воздух пропускается через колонну, отделяясь от атмосферы. Постоянно измеряются температура и относительная влажность высушенного аэрозоля и регенерирующей в данный момент колонки. Когда относительная влажность высушенного аэрозоля превышает определенный порог, колонки переключаются. Для этой цели каждая колонна может быть перекрыта сверху и снизу шаровыми кранами с приводом от двигателя. Затем в первой колонке образуется силикагель, а во второй колонке аэрозоль высушивается.

Сушка путем разбавления. Этот метод требует непрерывной подачи сухого воздуха, не содержащего твердых частиц. Это также вносит в систему ряд неопределенностей. Во-первых, смешивание пробы с нулевым содержанием воздуха обычно требует турбулентности, что приводит к некоторым связанным с диффузией частиц потерям. Эта проблема может иметь второстепенное значение, если измерения программа концентра-концентраты на накопление-режим частицы; то есть, если частицы на верхнем и Нижнем концах на распределение частиц по размерам могут быть проигнорированы. Во-вторых, коэффициент разбавления должен контролироваться с большой точностью, чтобы предотвратить распространение связанной с этим ошибки на все измеренные концентрации в окружающей среде. Однако, если концентрация аэрозоля в окружающей среде уже низкая, например, как во влажных тропических лесах, разбавление может оказаться контрпродуктивной мерой. **Сушка нагреванием.** Нагрев пробы аэрозоля приводит к снижению относительной влажности в линии отбора проб. Недостаточно нагревать только поток аэрозоля, сохраняя прибор при комнатной температуре, поскольку температура точки росы останется неизменной. В случае, когда и поток аэрозоля, и прибор могут нагреваться для снижения относительной влажности, может быть применен умеренный нагрев для достижения температуры, которая не более чем на 10 К выше температуры окружающей среды, но не выше 40 °C. Необходимо понимать, что нагревание аэрозольного потока может необратимо изменить пробу, поскольку некоторые из наиболее летучих частиц будут испарены. По этой причине мы не рекомендуем нагревать поток для отбора проб аэрозоля. Можно считать, что только нагретый полностью воздухозаборник испаряет облака и капли тумана или приводит к скоплению льда на входе.

3.3 Конфигурации для отбора проб бетона

В этом разделе мы сравниваем примерные конфигурации систем подачи аэрозоля.

Эффективность переноса этих систем рассчитывается с помощью уравнений и параметризаций для движения частиц. Представленные ниже уравнения и их выводы можно найти, среди прочих источников, в подробных работах Хиндса (1999) и Барона и Виллеке (2001).

3.3.1 Общие аспекты движения частиц

Основная проблема при транспортировке аэрозоля к сборщикам и приборам для измерения аэрозоля заключается в том, чтобы избежать потерь частиц. Механизмы потери частиц зависят от размера и обычно вызываются диффузией частиц, соударением и осаждением. Как правило, потери из-за диффузии частиц являются критическими для ультрадисперсных частиц размером менее 0,1 мкм. Напротив, потери частиц из-за осаждения связаны с горизонтальными и наклонными трубами, в то время как потери из-за ударов связаны с изгибами. Конфигурация всего устройства для отбора проб и режим основного воздушного потока сильно зависят от назначения сети наблюдений.

Режим воздушного потока в трубе, ламинарный или турбулентный, характеризуется его числом Рейнольдса (Re). Поток в трубе ламинарный до значения Re, равного приблизительно 2000. При превышении этого значения поток постепенно становится все более и более турбулентным. Значение Re потока может быть определено с помощью:

$$Re_{\text{поток}} = \frac{\rho \times u_{\text{поток}} \times D_{\text{труба}}}{\mu} \quad (3.1)$$

где ρ - плотность газа, $u_{\text{поток}}$ - скорость потока, $D_{\text{труба}}$ - внутренний диаметр трубы, и μ - вязкость газа.

Инерция частицы в потоке характеризуется ее числом Стокса (Stk):

$$Stk = \frac{\tau \times u_{\text{потока}}}{D_{\text{мгн}}}$$

где:

$$\tau = \frac{D_p^2 \times C_C}{18 \eta}$$

τ - время релаксации частицы, $u_{\text{поток}}$ и скорость потока, $D_{\text{труба}}$ внутренний диаметр
 трубы, ρ плотность частиц, d диаметр частиц, C_C поправка
 коэффициент и Каннингема на вязкость газа.

3.3.2 Конфигурация отбора проб с ламинарным потоком

Как правило, рекомендуется ламинарный отбор проб аэрозоля для минимизации потерь частиц из-за диффузии и инерции в широком диапазоне размеров, особенно для частиц с образованием зародышей и крупнозернистых частиц. Кроме того, это позволяет поддерживать перепад давления на входе в приборы в пределах нескольких гектопаскалей. Минимальные потери из-за диффузии частиц в ламинарном потоке могут быть достигнуты за счет как можно более короткой длины трубы и как можно более высокого расхода. Потери супермикрометрических частиц можно свести к минимуму, избегая изгибов или горизонтально ориентированных труб для отбора проб. Чтобы спроектировать ламинарную конфигурацию отбора проб, проникновение частиц в зависимости от размера может быть рассчитано с использованием уравнений 3.2 и 3.3 (Hinds, 1999):

$$\mu^{23}P = 1 - 5.5377\mu \quad (3.2)$$

Для $\mu < 0,007$:

$$P = 0,819 \times \text{опыт}(-11,5) + 0,0975 \times \text{опыт}(-70,1) + 0,0325 \times \text{опыт}(-179) \quad (3.3)$$

Для $\mu > 0,007$.

$$\mu = \frac{D \times L_{\text{мпыба}}}{O} \quad (3.4)$$

- коэффициент диффузии частиц, где D — коэффициент диффузии частиц, $l_{труба}$ — длина трубы и Q — объем скорости потока.

В случаях, когда невозможно избежать изгибов в пробоотборной трубе, проникновение частиц в зависимости от размера может быть рассчитано следующим образом:

$$P = 1 - Stk \times \frac{\theta^\circ}{180 - \theta^\circ \pi} \quad (3.5)$$

где θ - угол изгиба,

Потери в зависимости от размера из-за осаждения супермикронетровых частиц в горизонтальных или наклонных трубах могут быть рассчитаны следующим образом:

$$P = 1 - \frac{2}{\pi} \left[\kappa \sqrt{1 - \kappa^2} - \frac{2}{\kappa^3} \left(1 - \kappa^2 \right)^{3/4} + \operatorname{arctg} \frac{1 - \kappa^2}{\kappa^3} \right] \quad (3.6)$$

с:

$$Z = \frac{L_{\text{труба}}}{D_{\text{труба}}} \times \frac{s_{\text{м}}}{u_{\text{поток}}} \quad (3.7)$$

это длина трубы, $D_{\text{труба}}$ где $L_{\text{труба}}$ внутренний диаметр трубы, $s_{\text{м}}$ осадочный материал- скорость вращения, $u_{\text{расход}}$ средняя скорость потока и угол наклона трубы к горизонтали Однотонные.

3.3.2.1 Примеры конфигураций отбора проб с ламинарным потоком

Конфигурация ламинарного отбора проб с низким расходом может быть предпочтительной, если требуется только ограниченный общий поток отбора проб. Например, физические и оптические аэрозольные приборы работают при низких скоростях потока и общей скорости потока $1 \text{ м}^3 / \text{ч}$ может быть достаточно во многих ситуациях. В этом случае коммерчески доступный ТЧ с низким расходом можно было бы использовать аэрозольный патрубком с 10 возможен вариант дополнительного ТЧ_{2,5} или В личку, циклон за впускной головкой. Стандартная конфигурация выборки может включать измерения количества частиц, распределения по размерам и коэффициентов рассеяния и поглощения света.

Особым случаем является конструкция, используемая для высоких башен. Для отбора проб с высотных башен требуется конструкция длинных труб для отбора проб, как показано на смотровой площадке Zotino Tall Tower (ZOTTO). Здесь проба аэрозоля отбирается по трубе длиной 300 м в лабораторию на земле с незначительными потерями частиц (Birmili *et al.*, 2007). Ламинарный поток со скоростью 40 л/мин обеспечивает эффективность проникновения частиц размером 10 нм на уровне 20%. Потери частиц из-за осаждения естественным образом сводятся к минимуму благодаря вертикальной конфигурации трубы. Одной из самых больших трудностей при использовании таких длинных труб может быть создание воздухопроницаемой пробоотборной трубы из множества отдельных частей.

3.3.3 Конфигурация отбора проб турбулентного потока

Конфигурации отбора проб высокоточных турбулентных аэрозолей могут использоваться на объектах мониторинга, которые уделяют основное внимание частицам, ответственным за радиационное воздействие на климат. Для того чтобы спроектировать турбулентную конфигурацию отбора проб, проникновение частиц в зависимости от размера может быть рассчитано с использованием следующих уравнений. Потери частиц, зависящие от размера, из-за диффузии, можно оценить как:

$$\delta = \frac{.28 \cdot 5D \times D^{1/4}}{\frac{\gamma}{Pe_{\text{поток}}^8} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{1/4}}$$

где D является коэффициентом диффузии, $D_{\text{труба}}$ внутренний диаметр трубы, γ газовый вязкость, плотность газа и $Re_{\text{расход}} G^0$ Re потока. Величина частиц в зависимости от размера скорости осаждения $u_{\text{деп}}$ к стенке затем определяется по формуле:

$$u_{\text{деп}} = \frac{D}{\delta}$$

Проникновение частиц в зависимости от размера может быть рассчитано следующим образом:

$$P = \text{опыт} \left(\frac{L_{\text{труба}} \times u_{\text{деп}}}{D_{\text{труба}} \times u_{\text{поток}}} \right)^{-4}$$

где $u_{\text{расход}}$ – средняя скорость потока и $u_{\text{деп}}$ – скорость осаждения частиц в зависимости от Stk и кривизна изгиба. Зависит от размера. Проникновение частиц можно приблизительно оценить по:

$$P = \text{exp} \left(-2.823 \times Stk \left(\frac{\theta}{180} \right)^{\frac{1}{2}} \right)$$

Проникновение в горизонтально ориентированную трубу из-за отложения осадка описывается формулой:

$$P = \text{опыт} \left(\frac{4Z \times \cos \left(\frac{\theta}{180} \right)}{\dots} \right)$$

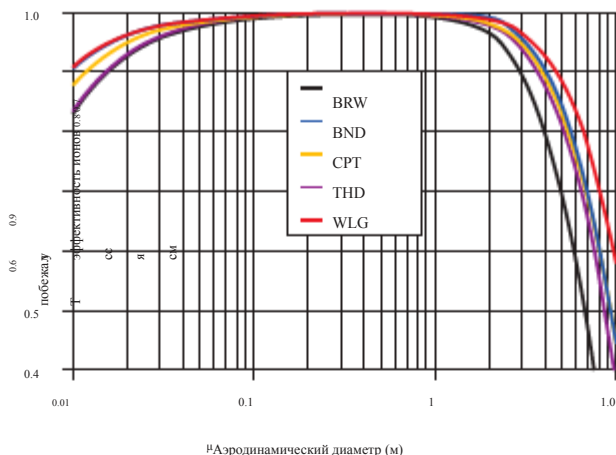
3.3.3.1 Пример конфигурации отбора проб с турбулентным потоком

Конфигурация отбора проб с турбулентным потоком используется на станциях долгосрочного аэрозольного мониторинга NOAA и предназначена для подачи кондиционированного аэрозольного потока со скоростью до 120 л / мин из общего входного отверстия в анализаторы и устройства для отбора проб. Эта конструкция оптимизирована для обеспечения количественных измерений частиц в диапазоне размеров аэродинамического диаметра 0,02 - 2,0 мкм с дополнительной целью достижения 50%-ного сбора частиц размером до 10 мкм. Конструкция может поддерживать работу нескольких анализаторов и фильтрующих пробоотборников, для параллельной работы которых требуется скорость потока до 30 л / мин каждый.

Компромиссы, необходимые для достижения этих целей проектирования, включают условия турбулентного течения в линиях отбора проб, субизокINETические условия при переходе к линиям отбора проб меньшего диаметра, и неизоаксиальные условия, при которых поток разделяется на четыре отдельные линии. Несмотря на эти компромиссы, расчеты потерь частиц из-за турбулентной диффузии, соударения и осаждения показывают, что расчетный критерий эффективности отбора проб в зависимости от размера удовлетворяется во многих реализациях системы, как показано на рисунке 3.5.

Конструкцию впускного отверстия можно вкратце описать следующим образом:

- Труба для отбора проб из поливинилхлорида (ПВХ) диаметром 20 см поддерживается треугольной конструкцией метеорологическая вышка, обычно возвышающаяся на 10 м над соседними строениями.
 - В качестве дождевика используется перевернутая емкость из нержавеющей стали. • Из трубки диаметром 5 см из нержавеющей стали с подогревом извлекается проба аэрозоля со скоростью 150 л / мин с $aRe = 4500$ от центра основного потока 1000 л / мин при $Re = 7500$.
 - Нагреватель управляется датчиком относительной влажности ниже по потоку для поддержания относительной влажности не более 40%, при этом термостат отключает нагреватель, если температура воздуха достигает 40 ° C.
 - Воздух, выходящий из нагретой трубки, распределяется по четырем линиям отбора аналитических проб (диаметром 1,9 см, по 30 л / мин каждый, $Re = 2700$) и один перепускной трубопровод (30 л / мин).
 - Линии отбора проб расположены под углом 3,75° к оси нагреваемой пробоотборной трубки. • Линии отбора проб диаметром 1,9 см изготовлены из нержавеющей стали и / или проводящего силикона.
- трубки различной длины, в зависимости от конкретной станции.



Расчетная эффективность отбора проб для некоторых существующих систем подачи аэрозоля: Барроу, **Рисунок 3.5** США (BRW), Бондвилл, США (BND), Кейп-Пойнт, Южная Африка (CPT), Тринидад-Хед, США (THD) и Маунт-Валигуан, Китай (WLG). Подробности приведены на странице <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aero/instrumentation/instrum.html>.

Преимуществами и недостатками этой конфигурации турбулентного отбора проб являются:

- высокая скорость потока аэрозоля,
- короткое время пребывания в системе отбора проб,
- уменьшенные потери из-за осаждения в горизонтальных трубах,
- увеличенные потери ультрадисперсных частиц из-за усиленной диффузии,
- увеличенные потери крупных частиц из-за усиленного соударения,
- ограниченная способность активно осушать поток аэрозоля.

3.4 Отбор проб без артефактов для анализа органического углерода

Частицы аэрозоля могут изменять свой размер и химический состав при изменении фаз окружающего газа. Это особенно очевидно для реакционноспособных частиц и для полупереходных аэрозольных компонентов; то есть частиц, которые сосуществуют в конденсированной (жидкой или твердой) и газовой фазах в значительных количествах, таких как H_2O , NH_4NO_3 и ряд полупереходных органических соединений. - 43 фунтов (SVOCs). Концентрации полупереходных соединений в конденсированной и/или газовой фазе регулируются константами равновесия. Этот принцип используется в аэрозольной технологии, например, для сушки аэрозольных частиц, как описано ранее. Это также приводит к нежелательным изменениям химического состава частиц, называемым "артефактами". Положительные и отрицательные артефакты отбора проб приводят к увеличению и потере ТЧ соответственно. Артефакты химического отбора проб приводят к модификации структур реакционноспособных молекул. Артефакты при отборе проб особенно важны, когда частицы собираются в течение более длительного периода времени на фильтрах или в ударной пленке перед анализом.

Положительные артефакты при отборе проб возникают в результате захвата собирающей средой или ТЧ уже собранных молекул, которые находились в газовой фазе в атмосфере. Диоксид серы,

было показано, что азотная кислота, аммиак и широкий спектр органических молекул в значительной степени улавливаются различными типами фильтров (и впоследствии влияют на определение отдельных частиц). Для предотвращения или, по крайней мере, уменьшения положительных артефактов при отборе проб можно использовать два метода: • Определение концентрации частиц в уменьшенном расходе аэрозоля с помощью виртуального импактора.

Недостатком этого метода является то, что более мелкие частицы, на траектории которых не влияют аэродинамические эффекты, не будут отбираться. Существует также риск осыпания частиц на сопле виртуального ударного элемента. • Удаление из пробы воздуха газообразных частиц, которые могут значительно повлиять на определение-

измельчение твердых частиц. Ограничением этого метода является то, что время пребывания образца в пробоотборнике должно быть достаточно длительным, чтобы обеспечить диффузию целевых молекул газа к стенкам пробоотборника; это не всегда возможно для пробоотборников с большим расходом. Использование денудаторов также может увеличить количество отрицательных результатов отбора проб артефактов, на которые также следует обратить внимание. Использование пропитанных денудантов было хорошо задокументировано, например, для азотной кислоты и аммиака, и рекомендовано ЕМЕП (www.emep.int). Для SVOC было показано, что использование многоканального устройства для удаления углеродного монолита снижает количество положительных артефактов при отборе проб до менее чем 20% на многих объектах по всей Европе. Отрицательные артефакты возникают в результате испарения ТЧ из конденсированной фазы в газовую фазу из-за изменений давления, температуры, относительной влажности и концентрации газовой фазы в образце аэрозоля по отношению к атмосфере. Негативных артефактов в значительной степени удастся избежать, когда аэрозольные частицы анализируются онлайн, без этапа сбора (например, в анализаторах с отдельными частицами), или собираются в виде капель жидкости, как в пароструйном аэрозольном коллекторе (SJAC; Хлыстов, Вайерс и Сланина, 1995) и в устройстве для отбора проб частиц в жидкость (PILS; Weber *et al.*, 2001), что также позволяет выполнять химический анализ частиц в режиме онлайн. При использовании фильтров или ударных элементов отрицательные эффекты могут быть определены путем измерения концентраций представляющих интерес веществ в газовой фазе после фильтра или ударного элемента. Обычно это делается путем анализа резервных фильтров, изготовленных из материала, способного улавливать эти виды. Трудности, связанные с этим подходом, включают:

- Необходимость оценить количество материала, первоначально собранного резервным фильтром поступающего из газовой фазы атмосферы (прорыв денудера).
- Риск загрязнения этих резервных фильтров, которые по своей сути очень подвержены поглощению молекул из газовой фазы.

Использование резервных фильтров в сочетании с денудаторами для определения NH без артефактов.⁴ NH₃ рекомендуется в руководстве ЕМЕП. Для SVOC этот вопрос гораздо сложнее, поскольку подходящий материал для резервных фильтров коммерчески недоступен, а прорыв денудаторов значителен и непостоянен. Недавние эксперименты, проведенные в Европе, показывают, что отрицательные артефакты для твердых частиц органического вещества составляют менее 10% и что их амплитуда существенно не увеличивается при использовании денудатора.

Химические артефакты могут возникать, когда собранные ТЧ подвергаются воздействию, например, на фильтре, во время отбора проб, воздушного потока со следовыми концентрациями газов, отличными от концентраций в атмосфере, где частицы были первоначально взвешены. Примеры включают кислотный аэрозоль, который может быть нейтрализован NH₃, и полиароматические углеводороды (ПАУ), которые могут окисляться или нитрифицироваться при³ -орНO₂ -через фильтр пропускается более насыщенный воздух. Также,

химические примеси можно свести к минимуму, удаляя нежелательные газы из воздушного потока с помощью подходящих денудаторов.

Следует отметить, что артефакты при отборе проб влияют не только на химический состав атмосферных ТЧ, но, возможно, также на физические и оптические свойства частиц, включая массовую концентрацию, особенно в местах и/или периодах времени, где полураспад вещества является основными составляющими аэрозоля.

Благодарности

Мы благодарим Андреа Хаудек (TROPOS) за подготовку технических эскизов, представленных на рисунках 3.1-3.4.

Ссылки

- Барон, П.А. и Виллеке, К. (ред.) (2001) *Измерение аэрозоля - принципы, методы, и приложения*, 2-е изд., John Wiley & Sons, Inc.
- Birmili, W., Stopfkuchen, K., Hermann, M. *et al.* (2007) Проникновение частиц через 300-метровую впускную трубу для отбора проб атмосферных аэрозолей с высокой метеорологической вышки. *Наука и технология в области аэрозолей*, **41**, 811-817. EC (1999) Директива Совета 1999/30/EC от 22 апреля 1999 г., касающаяся предельных значений содержания серы диоксида азота и оксидов азота, твердых частиц и свинца в окружающем воздухе. *Официальный журнал европейских сообществ*, **L 163**, 41-60.
- Аэрозольная технология: свойства, поведение и измерение содержания воздуха-переносимые частицы*, 2-е изд., John Wiley & Sons, Inc., Нью-Йорк.
- Хлыстов А., Вайерс Г. П. и Сланина Дж. (1995) Пароструйный аэрозольный коллектор. *Атмосферно-сферическая среда*, **29**, 2229-2234.
- Tuch, T.M., Haudek, A., Müller, T. *et al.* (2009) Дизайн и эксплуатационные характеристики автомобиля-регенерирующий адсорбционный аэрозольный осушитель matic для непрерывной работы на объектах мониторинга. *Методы измерения атмосферы*, **2**, 417-422. Винсент, Дж.Х. (2005) Измерение аэрозолей, связанных со здоровьем: обзор существующих критериев отбора проб критерии и предложения по новым. *Журнал экологического мониторинга*, **7**, 1037 - 1053.
- Вебер, Р.Дж., Орсини, Д., Даун, Ю. *et al.* (2001) Преобразователь частиц в жидкость для быстрого измерения химического состава аэрозоля в объеме. *Наука и технология в области аэрозолей*, **35**, 718-727.
- Вайнгартнер Э., Ньюки С. и Балтенспергер У. (1999) Сезонные и суточные колебания распределение $< D < 750$ нм) на высокогорном участке (Юнгфрауйох, 3580 м аэрозоля по размерам (10 мкм). *Журнал геофизических исследований-Атмосферы*, **104**(D21), 26809-26820.
- Виденсолер, А., Бирмили, В., Новак, А. *et al.* (2012) Спектрометр подвижности частиц по размеру-terms: гармонизация технических стандартов и структуры данных для обеспечения высокого качества долгосрочных наблюдений за распределением количества частиц в атмосфере по размерам. *Атмосферные методы измерений*, **5**, 657-685.
- ВМО (2003). Руководящие принципы и рекомендации ВМО/GAW по процедурам измерения аэрозолей-изменения. TD № 1178 ВМО - Отчет GAW № 153, Всемирная метеорологическая организация, Женева.

Аэрозольные Приборы

Da-Rep Chen¹ и Дэвид Ю. Х. Пуи²

¹ *Факультет машиностроения и ядерной инженерии, Содружество Вирджинии*

Университет, США

² *Факультет машиностроения, Университет Миннесоты, США*

4.1 Введение

Аэрозольные частицы могут состоять из микроскопических частиц материалов, от молекулярных кластеров всего нескольких нанометров в диаметре до частиц почти макроскопического размера, составляющего долю миллиметра в диаметре. Диапазон номинальных размеров, представляющих интерес для исследований аэрозолей и их применения, составляет от 2 нм до 100 мкм. Нижний предел размера, 2 нм, соответствует мельчайшим частицам, которые могут быть обнаружены аэрозольным прибором, таким как счетчик частиц сверхтонкой конденсации (CPC) (описан в разделе 4.4.1). Однако измерения наночастиц и ультрадисперсных аэрозолей в последнее время привлекают большое внимание в рамках национальной инициативы по нанотехнологиям (<http://nano.gov/>). Ультрадисперсные аэрозоли образуются в атмосфере самопроизвольно (т.е. в результате образования зародышей) и выбрасываются транспортными системами, энергетическими установками и производственными процессами. Инженерные наночастицы, полученные в результате газофазного синтеза или жидкофазным способом, являются важными строительными блоками для наноразмерных материалов и устройств. Наночастицы часто обладают особыми физическими (т.е. механическими, электрическими, оптическими и магнитными), химическими или биологическими свойствами по сравнению с частицами микрометрового размера того же состава. Чтобы понять частицы процессов образования, необходимо- димого для характеристики частиц менее 1 нм. Самые крупные частицы - это те, которые выпадают из газов-носителей слишком быстро, чтобы считаться аэрозолем, например капли дождя. Определение размера частиц важно, поскольку многие свойства аэрозоля зависят от размера частиц. Например, в медицинских исследованиях осаждения частиц в различных областях человеческой респи- дыхательных путей является функцией размера частиц.

Аэрозольные приборы измеряют различные свойства аэрозоля. К ним относятся количество аэрозоля, концентрация, массовая концентрация, концентрация по площади поверхности, распределение по размерам, непрозрачность, и химический состав. Распределение частиц по размерам обычно представляется как частица концентрации с точки зрения количества, поверхность, или объемные (массовые) взвешивания в зависимости от размера частиц. Хотя многие приборы предоставляют данные в зависимости от "размера" частицы, этот так называемый "размер" на самом деле зависит от одного из многих свойств частицы, включая оптическую, аэродинамическую, механическую подвижность частиц или подвижность в силовом поле..... Таким образом, важно обращать внимание при сравнении размеров частиц, измеренных в соответствии с различными принципами. Часто требуются корректировки данных, чтобы учесть различия между ними.

Для определения характеристик аэрозоля доступны две категории аэрозольных приборов. Один из них - это приборы для отбора проб аэрозоля. Они собирают частицы для микроскопического, гравиметрического или химического анализа. Приборы этой категории часто позволяют производить усредненное по времени измерение концентрации. Скорость отбора проб и временные требования обычно зависят от аналитических методов, которые должны применяться к отобраным пробам частиц. Из-за их усредняющей по времени природы возможность химического взаимодействия между частицами и частицами-субстратами может стать проблемой.

Другая категория - приборы прямого считывания, с помощью которых осуществляется отбор проб аэрозоля и анализ и мгновенно получается интересующий объект. Благодаря наличию современной электроники приборы с прямым считыванием данных способны проводить измерения в режиме реального времени. Быстрая реакция приборов с прямым считыванием позволяет отслеживать быстрые изменения как размера частиц, так и концентрации или получать хорошую статистику подсчета, поскольку они позволяют выполнять повторные измерения за короткий промежуток времени. Эти приборы обычно используют методы непрямого измерения, и поэтому для обеспечения точной калибровки прибора необходимо приложить много усилий. Точность этих приборов зависит от взаимосвязи между сигналом датчика и свойствами аэрозоля. Хотя эта взаимосвязь часто может быть выведена из первых принципов, очень распространено установление эмпирической взаимосвязи с использованием "хорошо откалиброванных или стандартных" аэрозолей. Потенциальная проблема такого подхода к калибровке заключается в том, что измеряемый аэрозоль может иметь иное отношение к свойствам сигнала, чем "калиброванный или стандартный" аэрозоль, что может привести к неточности измерения.

В этой главе мы сначала представим общую стратегию, применяемую в аэрозольном приборостроении, а затем обсудим ввод и транспортировку образцов частиц, поскольку они связаны с измерениями аэрозоля. В последующих разделах будут описаны избранные аэрозольные приборы и методы измерений, обычно применяемые при исследованиях аэрозолей и их применении. Из-за ограничения объема страницы мы не сможем охватить все используемые принципы и инструменты; тех, кто желает более подробно ознакомиться с предметом аэрозольного приборостроения, отсылают к справочнику под редакцией Кулкарни, Барона и Виллеке (2011). Серия монографий, опубликованных Комитетом ACGIH по отбору проб воздуха, стала бы хорошим источником информации для тех, кто желает ознакомиться с практическими аспектами конкретных аэрозольных приборов (например, ACGIH 2008a, 2008b, 2009).

4.2 **Общая Стратегия**

Общая стратегия определения характеристик аэрозоля представлена на рис. 4.1. Частицы аэрозоля отбираются из окружающей среды или из определенных источников в прибор через входное отверстие для отбора проб. Размер-селективный входной выборки часто используется либо для удовлетворения конкретных

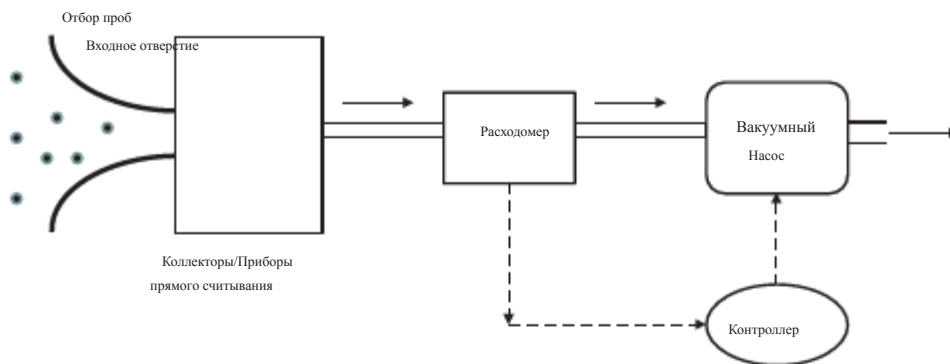


Рисунок 4.1

Принципиальная схема стратегии определения характеристик аэрозольного оборудования.

отбор проб или снижение требований к применению аэрозольных систем.

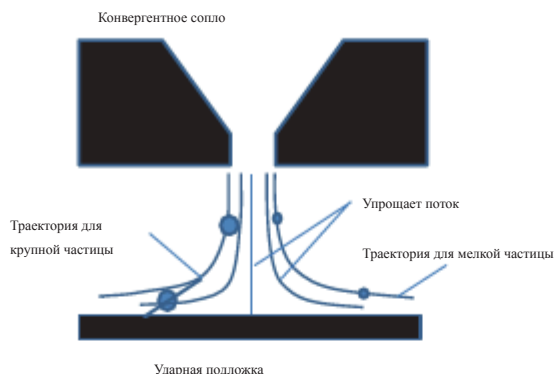
потенциальная интерференция от частиц больших размеров. После отбора пробы в прибор частицы осаждаются либо на коллекторе (т.е. подложке или фильтре) в устройстве для отбора проб аэрозолей, либо направляются в измерительный объем прибора с прямым считыванием. Для выполнения задачи отбора проб используется вакуумный насос, а расходомер контролирует объемный или массовый расход пробы. Для точного контроля расхода пробоотбора часто используется контур управления с обратной связью. Поскольку физические свойства аэрозолей часто представлены в единицах концентрации (т.е. количество / массовая концентрация), общий объем отбора проб за период отбора проб (рассчитывается путем умножения измеренного объемного расхода на время отбора проб) является ключевым параметром для аэрозольных приборов.

4.3 Патрубки отбора проб аэрозольных частиц и транспорта

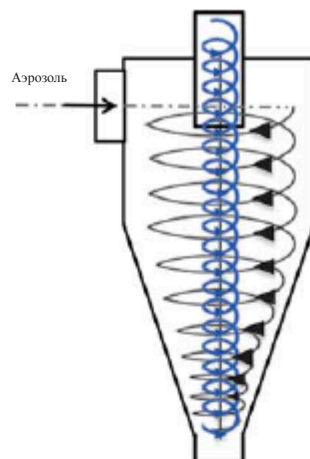
Стремление эффективности, определяемый как процент частиц, проникающих через самплинг входное отверстие, часто используется для описания характеристик выборки входов. Эффективность аспирации на входе для отбора проб зависит от размера частиц, конструкции входного отверстия и окружающей среды. В аэрозольных приборах часто используются отверстия для отбора проб с возможностью выбора размера из-за требований к отбору проб, например, ТЧ

2.5

мкм, или для минимизации потенциальных помех от более крупных частиц. Частицы крупнее определенного размера часто удаляются для светорассеивающих приборов. Присутствие крупных частиц рассеивает много фотонов и не позволяет приборам точно обнаруживать частицы гораздо меньших размеров. Эти селективные по размеру выпускные отверстия могут быть выполнены с использованием методов разделения, основанных на инерции частиц. Примерами таких выпускных устройств являются одноступенчатые ударные установки и циклоны (как показано на рисунке 4.2). В одноступенчатом ударном элементе скорость частиц ускоряется с помощью сужающегося сопла, обращенного к твердой подложке под ним. Когда поток, насыщенный частицами, приближается к подложке, поток отклоняется и совершает свой поворот. Однако частицы с высокой инерцией (т.е. крупные частицы) не могут следовать за поворотом потока и отклоняются от линии течения и ударяются о подложку. Частицы с низкой инерцией (т.е. мелкие частицы) движутся вместе с газом-носителем и улетучиваются при ударе. В результате частицы с размерами, превышающими определенное критическое значение, будут собираться в одноступенчатом ударном устройстве. Циклоны отделяют частицы с помощью центробежных сил. Действующая центробежная сила



(a) Принципиальная схема одноступенчатого ударного элемента



(b) Принципиальная схема одноступенчатого циклона

Принципиальные схемы (a) одноступенчатого ударного элемента и (b) одноступенчатого циклона Рисунок 4.2 как входные отверстия для отбора частиц по размеру.

воздействие на частицы создается тангенциальным впрыском потока частиц-носителей в циклон.

Чем выше тангенциальная скорость потока носителя, тем выше центробежная сила в циклоне. Таким образом, частицы с высокой инерцией собираются на стенке циклона, в то время как частицы с низкой инерцией проникают через устройство. При отборе проб аэрозоля из окружающей среды важно свести к минимуму влияние ветра на эффективность отбора проб из аэрозольных впускных отверстий. Таким образом, для достижения этой цели было разработано всенаправленное отверстие для отбора проб (Liu and Pui, 1981). В дополнение к эффективности аспирации на входе для отбора проб аэрозоля, потери частиц в транспортном трубопроводе от входа либо к коллекторам, либо к измерительным объемам аэрозольных приборов также важны для определения характеристик аэрозоля. Проникновение частиц через транспортный трубопровод зависит от размера частиц, скорости потока и типа труб.

Общая эффективность отбора проб аэрозольного прибора является совокупным результатом эффективности аспирации через входное отверстие для отбора проб и эффективности проникновения частиц через транспортирующие трубопроводы. Для получения точного распределения по размерам в схемах сокращения данных необходимо учитывать эффективность отбора проб аэрозольных приборов. Тем, кто интересуется темой отбора проб аэрозолей, следует обратиться к Vincent (2007).

4.4 Измерение Интегрального момента

Измерение интегрального момента общего распределения частиц по размерам осуществляется с помощью либо приборов для отбора проб аэрозоля, либо приборов прямого считывания. С помощью приборов для отбора проб аэрозоля частицы собираются на поверхности подложки и затем характеризуются с помощью электронных микроскопов (т.е. сканирующего электронного микроскопа /просвечивающего электронного микроскопа, SEM/TEM). Учитывая известный объем отбора проб и эффективность отбора проб, можно рассчитать общее количество концентраций частиц. Для измерения общей массовой концентрации, частицы обычно собираются фильтрами; измеряя массу фильтра до и после отбора проб, можно получить массовую концентрацию частиц.

Интегральные детекторы концентрации с прямым считыванием могут использоваться для измерения одного интегрального параметра всего распределения частиц по размерам, такого как общее количество, поверхностная и массовая концентрация, или суммарные коэффициенты рассеяния света или поглощения. В этом разделе описано несколько широко используемых приборов, в том числе СРС для определения количественной концентрации, кварцевые микровесы (QCM) и конические колебательные микровесы (ТЕОМ), используемые для измерения массовой концентрации, и другие методы, основанные на рассеянии света.

4.4.1 Измерение общей количественной концентрации: Счетчик частиц конденсата (СРС)

СРС, или счетчик ядер конденсации (CNC), широко используется для измерения частиц в диапазоне диаметров примерно от 0,005 до 1,0 мкм. Этот прибор работает путем пропускания потока аэрозоля через область, перенасыщенную парами, образующуюся в результате прямого контактного охлаждения, которое вызывает конденсацию пара на частицах. Затем частицы выращивают до такого размера, при котором их можно обнаружить оптически с помощью рассеяния света. СРС включают в себя системы непрерывного потока прямого контакта (Briggs, 1976; Синклер и Юэ, 1982) и тип, который смешивает поток горячего пара и поток холодного аэрозоля для достижения состояния пересыщения (Kousaka *et al.*, 1982).

На рисунке 4.3 показана принципиальная схема СРС с непрерывным потоком (Агарвал и Сэм, 1980). В качестве рабочей жидкости в этом приборе используется бутиловый спирт. Поток воздуха насыщается парами рабочей жидкости в сатураторе, поддерживаемом при температуре 35 °С. Последующее охлаждение этого насыщенного парами воздушного потока в термоэлектрически охлаждаемой трубке конденсатора при температуре 10 °С обеспечивает требуемое пересыщение для конденсации пара на частицах. Частицы выращиваются до супермикронного диапазона после прохождения через трубку конденсатора. Это

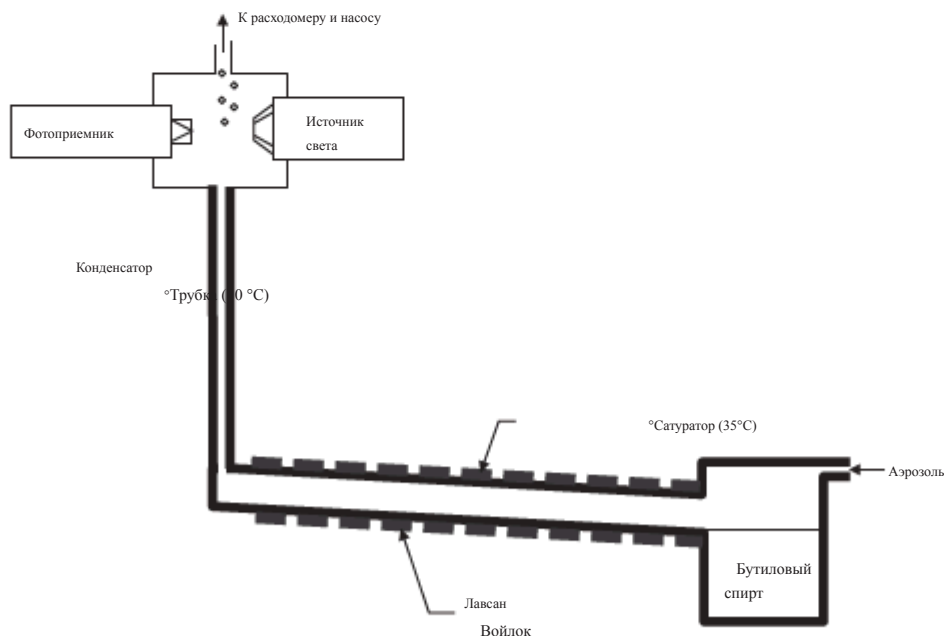


Рисунок 4.3 Принципиальная схема непрерывного счетчика частиц конденсата (СРС).

затем обнаруживается оптически с помощью рассеяния света. Частицы с числовой концентрацией ниже определенного уровня подсчитываются CPC индивидуально в режиме подсчета отдельных частиц. Некоторые CPC включают так называемый "фотометрический режим", основанный на полном рассеянии света, для подсчета частиц с числовой концентрацией выше определенного уровня.... Диапазон количественных концентраций, измеряемых CPC, составляет от $0,01 \text{ \#}/\text{см}^3$ до $10^7 \text{ \#}/\text{см}^3$ для индивидуального подсчета частиц. В фотометрическом режиме максимальная количественная концентрация, обнаруживаемая CPC, достигает $10^8 \text{ \#}/\text{см}^3$.

Калибровочные исследования CPC показали, что при размере частиц менее $0,005 \text{ мкм}$ отклик прибора начинает снижаться с уменьшением размера частиц (Zhang and Liu, 1990; McDermott, Ockovic и Stolzenburg, 1991; Stolzenburg and McMurry, 1991; Keston, Reineking и Porstendorfer, 1991; Noone and Hansson, 1990). Снижение температуры в первую очередь вызвано отсутствием 100% активации из-за неоднородного распределения концентрации пара в конденсаторе (Engilmez and Davies, 1984). Введя в CPC чистую оболочку из воздуха вокруг аэрозольного потока, Штольценбург и Макмарри (1991) смогли повысить эффективность подсчета прибора более чем на 70% при размере частиц $0,003 \text{ мкм}$, в результате чего был создан коммерческий счетчик ультрадисперсных конденсационных частиц (UCPC).

CPC на водной основе являются новейшей разработкой в приборах этого типа (Hering and Штольценбург, 2005; Hering *et al.*, 2005). Для конденсации водяного пара на частицах, эти CPC сначала охлаждают отобранный аэрозоль, а затем подают поток аэрозоля в насыщенный влагой нагретый "конденсатор". В нагретом конденсаторе водяной пар диффундирует от водонасыщенной пористой стенки к внутренней части трубки; он конденсируется на частицах при подаче охлажденного аэрозольного потока в трубку. Метод обнаружения событий частиц такой же, как и в CPC на основе бутанола. Особое внимание необходимо уделять применению таких CPC. Их калибровка показывает, что их нижний предел обнаружения может быть таким же хорошим, как у CPC на основе бутанола, когда они обнаруживают частицы со слабогидрофильными материалами. Для высокогидрофобных частиц нижний предел обнаружения может достигать 20-30 нм. 4.4.2

Измерение общей массовой концентрации: кварцевые микровесы

(QCM) и конические колебательные микровесы (TEOM)

Были разработаны датчики, которые измеряют массовую концентрацию отобранных частиц практически в режиме реального времени. В QCM в качестве чувствительного элемента используется кристалл кварца. Осаждая частицы на кристалле кварца, можно повлиять на его естественную частоту колебаний. Сдвиг в частоте колебаний затем используется как мера массы осаждаемых частиц, которая пропорциональна сдвигу частоты. Осаждения частиц может быть достигнуто либо за счет электро- статического осадков (Лундгрен, Картер, и Дэйли, 1976; SEM и Tsurubayashi, 1975; Сэм Tsurubayashi, и Хомма, 1977) или инерционное уплотнение (Чуань, 1976). Чувствительность QCM составляет приблизительно $10^9 \text{ Гц}/\text{г}$, что соответствует сдвигу частоты на 1 Гц для кварцевого кристалла с плоской огранкой на 10 МГц.

Принцип действия ТЕОМ такой же, как и у QCMs (Паташник и Руппрехль, 1980). Вместо того чтобы полагаться на собственную частоту кварцевого кристалла, вибрация полого конического элемента инициируется и поддерживается электронной системой обратной связи. Колебания конического элемента контролируются светоизлучающим диодом и фототранзистором, расположенными перпендикулярно схеме колебаний конического элемента. На рисунке 4.4 показано типичное устройство ТЕОМ. Отобранный поток аэрозоля собирается фильтром, установленным на верхней части конического элемента. Затем масса собранных частиц определяется по разнице частот до и после каждого отбора проб. В отличие от

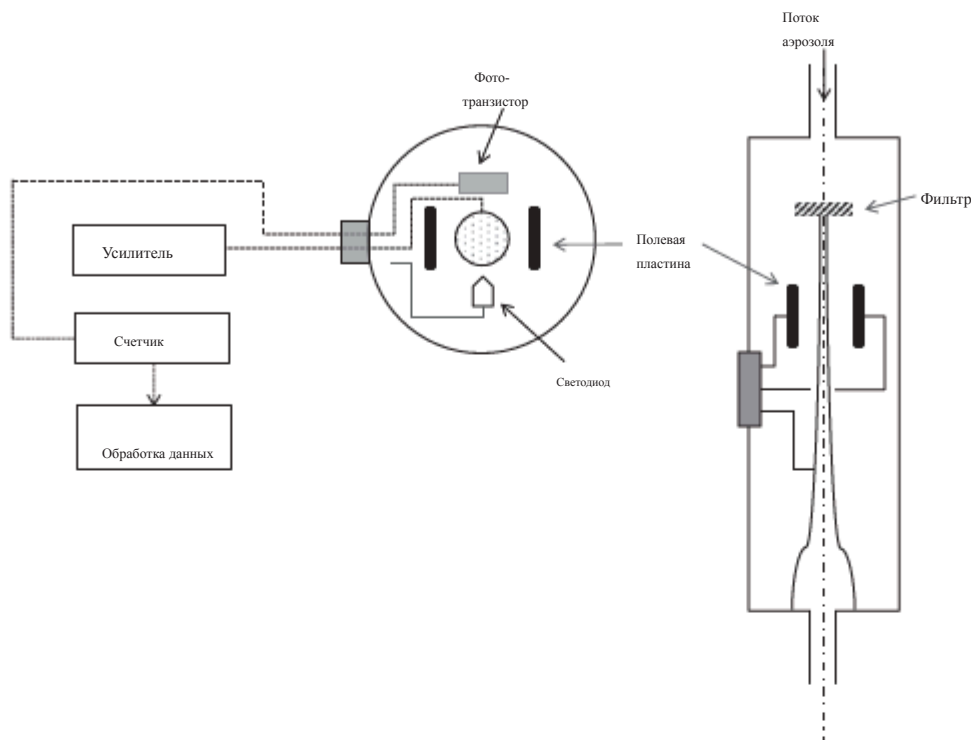


Рисунок 4.4 Принципиальная схема колебательного микровеса с коническим элементом (ТЕОМ).

в QCMs масса собранных частиц не прямо пропорциональна сдвигу частоты; вместо этого она пропорциональна разнице в обратном квадрате частот до и после отбора проб. Конструкция ТЕОМ расширяет возможности измерения массовой концентрации частиц до диапазона граммов на кубический метр.

4.4.3 Светорассеивающие фотометры и нефелометры

Для атмосферных исследований важен общий коэффициент светорассеяния частиц, находящихся в воздухе, поскольку он связан с атмосферной видимостью или дальностью видимости. Измерение общего коэффициента светорассеяния обычно производится с помощью фотометра или интегрирующего нефелометра. Для аэрозолей, отличающихся только концентрацией и имеющих одинаковое распределение по размерам, интегральное измерение светорассеяния может быть преобразовано в массовую концентрацию (Ваггонер и Чарльсон, 1976). В случае аэрозолей, отличающихся только концентрацией по размерам.

На рис.4.5 показана принципиальная схема интегрирующего нефелометра. Частицы освещаются в воспринимающем объеме, и рассеянный свет от частиц достигает фоторецептора под широким углом вне оси. Хотя первоначально прибор использовался для измерения дальности видимости, он нашел применение при изучении атмосферного аэрозоля в городах и сельской местности. Было показано, что в некоторых случаях рассеяние хорошо коррелирует с атмосферной концентрацией сферической массы (Ваггонер и Чарльсон, 1976).

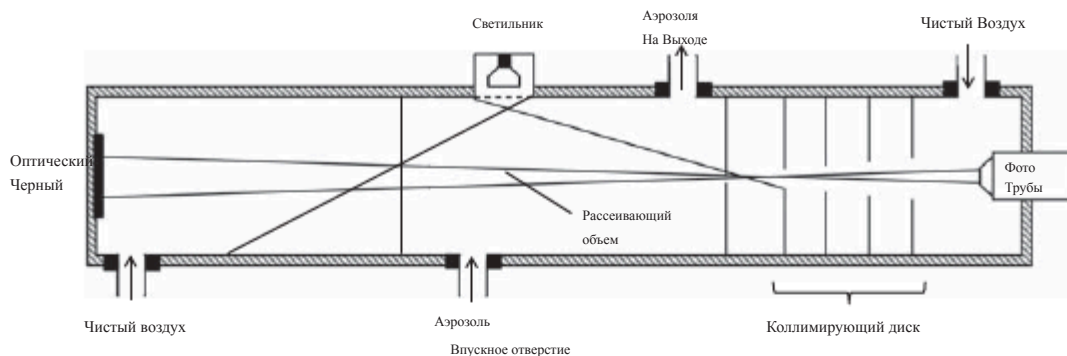


Рисунок 4.5 Принципиальная схема интегрирующего нефелометра.

Серийно выпускаются фотометры, в которых используется лазер или лампа накаливания источник света и оптика, аналогичная микроскопии в темном поле. В отличие от нефелометров, сфокусированный луч света направляется на аэрозольное облако; на фотоприемнике собирается только свет, рассеянный в четко определенном диапазоне углов. На дисплее отображается массовая или количественная концентрация, но калибровка может изменяться в зависимости от состава и распределения частиц по размерам. Основываясь на решениях уравнений Максвелла, фотометры с прямым рассеянием менее чувствительны к изменению показателя преломления частиц, чем фотометры с другими углами измерения, такими как 30° , 45° и 90° .

4.5 Измерение площади Поверхности частиц

Недавние исследования токсичности наночастиц показали, что биологическая реакция клеток легких человека и животных после воздействия наночастиц имеет сильную корреляцию с площадью поверхности наночастиц (Oberdorster, 1996; Donaldson, Li, and MacNee, 1998). Были исследованы различные методы измерения общей площади поверхности аэрозольных частиц. Один из методов, "эпифаниометр", помечает частицы радиоактивным материалом и измеряет радиоактивность после камеры мечения частиц с использованием ап-детектора (Pandis *et al.*, 1991). Реакция хорошо коррелирует с общей площадью поверхности частиц. Радиоактивный

Используется переменный ток, который обеспечивает постоянную подачу ²¹⁹Rn, который, в свою очередь, распадается. Для ²¹¹Pb. ²¹¹Pb - это то, что на самом деле помечает частицы. К сожалению, строгое регулирование, которое все чаще применяется к использованию радиоактивных веществ и контролю за ними, препятствует массовому использованию устройств этого типа. Кроме того, этот метод не измеряет фактическую площадь поверхности частиц. Вместо этого, характеризуется так называемая "площадь активной поверхности" или "площадь поверхности Фукса" (Pandis *et al.*, 1991).

Другой метод получения общей площади поверхности частиц, предложенный By *et al.*, (2001), предполагает использование нескольких интегральных моментных инструментов. В технико-экономическом обосновании этой технологии использовались СРС для измерения общего количества частиц (т.е. нулевого момента распределения частиц по размерам), EAD (электрический аэрозольный детектор) для измерения общей длины частиц (т.е. первого момента) и нефелометр для измерения общей массовой концентрации частиц (т.е. третьего момента распределения частиц). Затем из измеренных данных была получена общая площадь поверхности частиц (т.е. Второй момент распределения частиц по размерам) с допущением логарифмического распределения частиц по размерам.

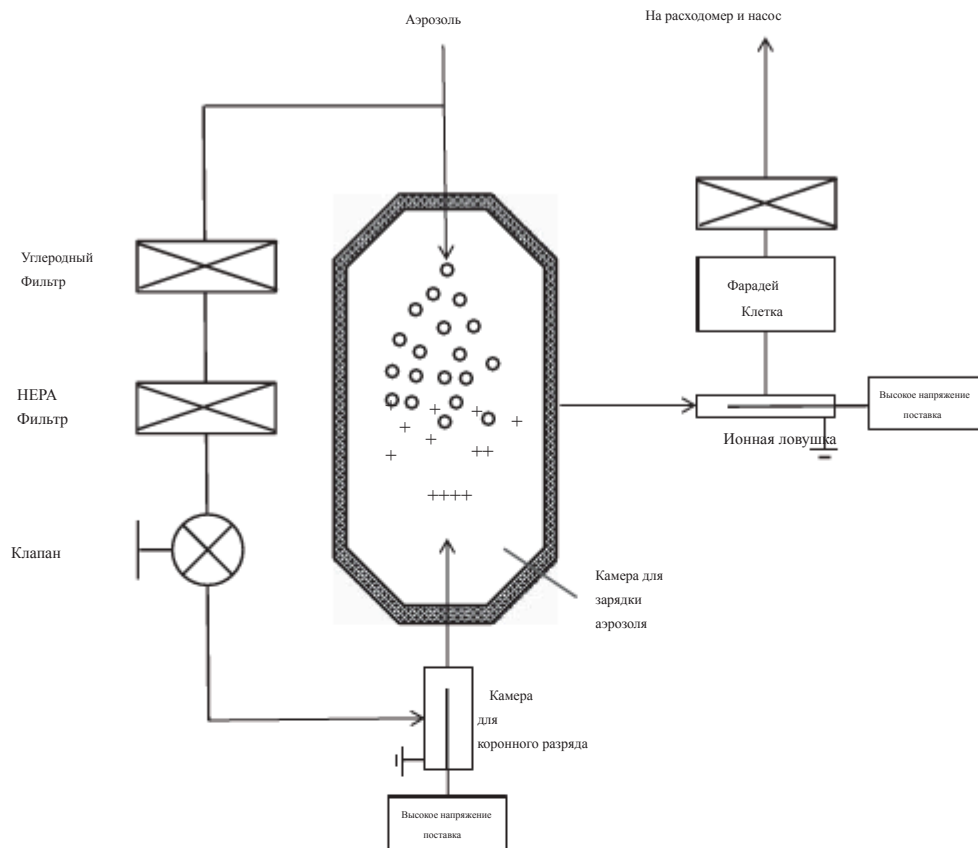


Рисунок 4.6 Принципиальная схема коммерчески доступного монитора с нанометровой площадью поверхности (NSAM).

Новая разработка в области измерения площади поверхности наночастиц, нанометровый монитор площади поверхности (NSAM) (показан на рисунке 4.6), основан на площади поверхности частиц, которые вдыхаются и оседают в легких человека. Конфигурация NSAM основана на конфигурации EAD (Shin *et al.*, 2007). Отобранный поток аэрозоля сначала разделяется на два потока: один, насыщенный частицами, поступает в камеру загрузки аэрозоля, в то время как в другом частицы частиц и органические пары удаляются фильтрами и используются в качестве ионного носителя, проходя через камеру коронного разряда. Частицы электрически заряжаются в зарядной камере, когда два потока сталкиваются, когда они текут в противоположных направлениях. Электрические заряды, приобретенные частицами, затем регистрируются чувствительным аэрозольным электрометром типа клетки Фарадея после прохождения через ионную ловушку, которая в настоящее время используется в качестве осадителя частиц. Регулируя потери частиц в ионной ловушке (т. е. Изменяя напряжение, установленное на ионной ловушке), реакция EAD становится линейной функцией размера частиц. Применяя опубликовано легких осаждения кривые для альвеолярных отростков челюстей (а) и трахеобронхиального (ТБ) областях легких человека площадь поверхности концентрация легких оседает парти- клес как измеряется NSAM также является линейной функцией размера частиц в диапазоне от 10 до 600 Нм (Fissan *et al.*, 2007). Эмпирически определяется коэффициент, который коррелирует с показаниями NSAM и рассчитанными концентрациями частиц по площади поверхности, осажденных в областях А и ТБ.

4.6 Измерение распределения по размерам

Чтобы охарактеризовать распределение частиц по размерам, частицы необходимо собирать на заглушке SEM/ TEM в аэрозольных пробоотборниках либо ударом, либо электростатическим осаждением. Микроскопические методы (т.е. SEM / TEM) затем может быть применен для характеристики размера и количества собранных частиц. Любой из методов прямого интегрального измерения концентрации, описанных в этой главе, может использоваться в сочетании с соответствующим устройством для классификации частиц по размерам для измерения распределения аэрозолей по размерам. В этом разделе мы представляем методы, используемые для измерения распределения по размерам, основанные либо на взаимодействии частицы со светом, либо на различии в свойствах частиц, а именно на инерции частиц, их электрической подвижности и диффузионной способности. 4.6.1

Методы, основанные на взаимодействии частиц

со светом 4.6.1. Оптический счетчик частиц (ОПС)

Оптические счетчики частиц (ОПС) широко применяются для измерения распределения частиц по размерам как внутри помещений, так и на открытом воздухе. На рисунке 4.7 показан принцип работы ОПС. Отдельные частицы переносятся потоком воздуха через освещаемый объем в счетчиках. Взаимодействие отдельной частицы со световым лучом рассеивает фотоны во всех угловых направлениях. Рассеянный свет в определенном диапазоне углов затем оптически собирается и направляется на фотоприемник, который генерирует импульс напряжения, когда частица проходит через освещаемый объем. Высота каждого импульса регистрируется и преобразуется в размер частиц на основе калибровочной кривой для данного счетчика. Количество импульсов в ячейках с разной высотой импульса подсчитывается для получения гистограммы высоты импульса, которая затем преобразуется в гистограмму распределения частиц по размерам. Коммерческие счетчики.

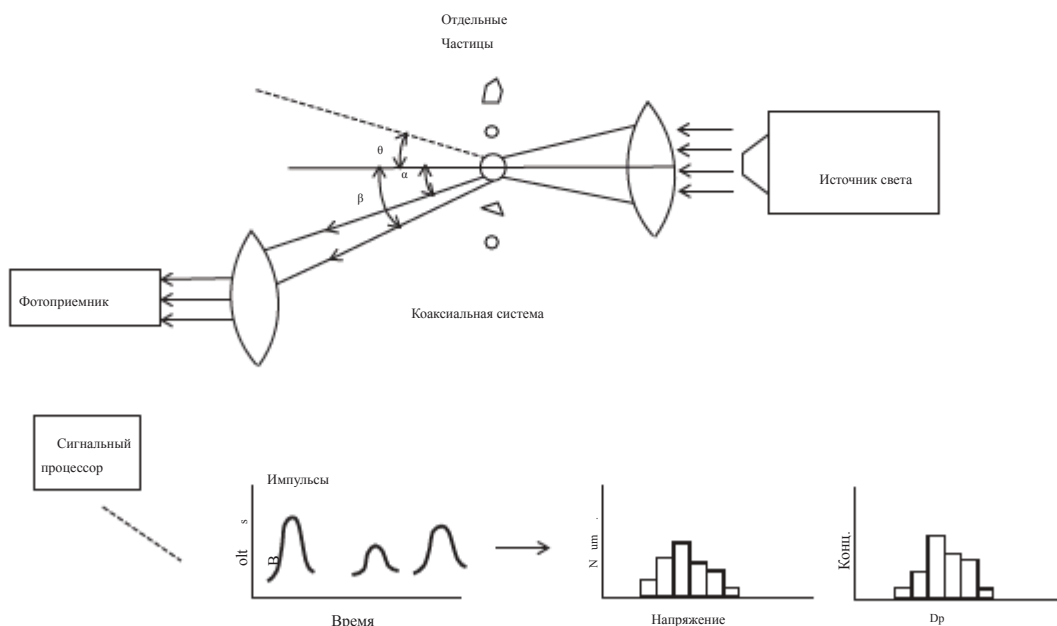


Рисунок 4.7

Принцип действия оптического счетчика частиц (ОПС).

для измерения распределения частиц по размерам в диапазоне от 0,3 до приблизительно 10 мкм были разработаны устройства с использованием источника света накаливания. Современные счетчики в основном используют лазерную подсветку для достижения более низких пределов обнаружения, вплоть до 0,1 мкм.

Функциональная зависимость между высотой импульса ОРС и размером частиц зависит как от конструкции прибора (т.е. оптической конструкции, источника освещения и электронного усиления), так и от свойств частиц (т.е. размера и формы частиц пучке).

Для ОРС с осесимметричной геометрией рассеяния ($\theta = 0^\circ$) и ближним направлением, узкоугольный ($\alpha < \beta < 30^\circ$) обнаружение, простая геометрия обеспечивает сильные сигналы, но с высокими фоновыми шумами. Он также чувствителен к сильному многозначному отклику; то есть к различным размерам частиц, дающим одинаковую высоту импульса. Конструкция относительно нечувствительна к изменениям реальной и мнимой частей показателя преломления. Для счетчика с широкоугольным детектором отклик более чувствителен к деталям, но гораздо менее склонен к многозначному отклику, особенно при освещении белым светом (Liu, Szymanski, and Pui, 1986).

В дополнение к абсолютной напряженности-размер реакции ОПВ, со, иного документа характеристик, таких как разрешение, считавшееся совпадением, ответ на частицы неправильной формы, а впускная эффективность, также важным при подборе центров для конкретных приложений. Экспериментальных исследований, как правило, требуется для получения этих характеристик. Например, Лю, Шимански и Пуи (1986) сообщили об оценке производительности нескольких коммерчески доступных счетчиков белого света с использованием монодисперсных сферических частиц. Лю, Берглунд, и Агарвал (1974), Вен и Каспер (1986), а также Лю и Шимански (1987) оценили эффективность подсчета нескольких коммерческих ОРС. Более поздние работы в основном связаны с оценкой лазерных оптических систем (Ким и Боутман, 1990; ван дер Мелен и ван Эльзаккер, 1986; Чен, Ченг и Йех, 1984; Шимански и Лю, 1986).

Недавние разработки в ОРС включают повышение уровня совпадения подсчетов при поддержании высокой скорости потока отбора проб, измерение показателей преломления частиц (Шимански и Шиндлер, 1998) и определение формы частиц с использованием интенсивности рассеяния по многоугольному рассеянию света (Дик, Макмарри и Боттигер, 1994; Сачве *et al.*, 1995, 1998).

4.6.2 Методы, основанные на инерции

частиц 4.6.2.1 Анализаторы релаксационных размеров частиц

Помимо прямого измерения, рассеяние света также может использоваться в сочетании с другими принципами определения размера для получения распределения частиц по размерам (Mazumder and Kirsch, 1977). Одним из примеров является использование ускоряющего сопла в сочетании с измерением рассеяния света в аэродинамическом анализаторе частиц (APS), описанном Агарвалом. *et al.*, (1982). На рисунке 4.8 показана принципиальная схема APS. В этом приборе одиночная частица ускоряется через небольшое сужающееся сопло, причем получаемая скорость зависит от размера частицы. Из-за эффекта инерции частиц, чем больше размер частиц, тем ниже скорость частиц. Затем скорость на выходе из сопла измеряется путем определения времени, необходимого для прохождения двух лазерных лучей, расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга. Разница между измеренной скоростью частиц и скоростью газа-носителя на выходе из сопла затем используется для определения размера частиц. Этот принцип позволяет измерять "аэродинамический размер" частиц в диапазоне размеров 0,5-30,0 мкм (Chen, Cheng, and Yeh, 1985; Baron, 1986).

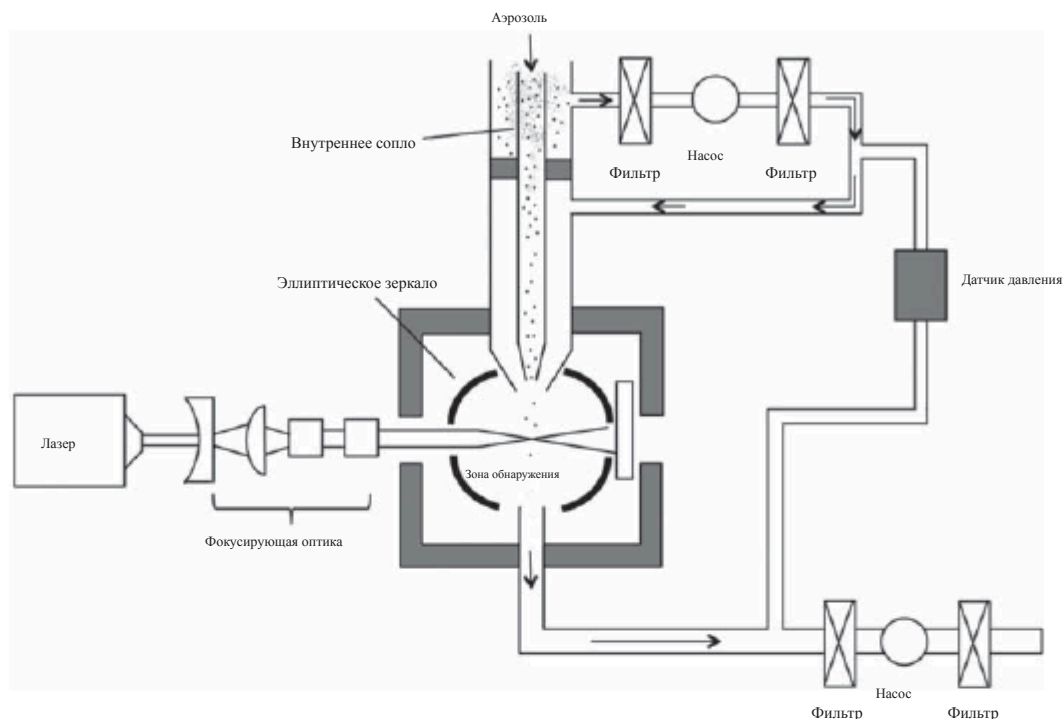


Рисунок 4.8 Принципиальная схема аэродинамического анализатора частиц (APS).

Недавняя разработка APS включает ультрафиолетовый (UV) импульсный лазер для определения проницаемости биоаэрозоля. Принцип действия APS также применяется в масс-спектрометрии аэрозолей для определения размера частиц и состава (Сильвия и Пратер, 1998; Солт, Ноубл и Пратер, 1996; Сильва и Пратер, 1997).

4.6.2.2 Каскадные ударные устройства

Ударные устройства собирают частицы на основе своей инерции. Как описано ранее, частицы с диаметром, превышающим определенное значение (т.е. предельный размер частиц), собираются на твердом подложке (т.е. ударной подложке) в одноступенчатом ударном элементе. Размер отсекаемых частиц ударного элемента может быть уменьшен за счет разгона частиц до более высокой скорости за счет использования сопел меньшего диаметра. Каскадный ударный элемент обычно состоит из серии одноступенчатых ударных элементов, с самым большим соплом на верхней ступени и самым маленьким соплом на последней ступени (показано на рис. 4.9). Частицы, проходящие через последнюю стадию, часто собираются фильтром. При таком расположении частицы с диаметрами, превышающими предельный размер верхней ступени (т.е. ступени 1), будут собираться на верхней ударной подложке; частицы с диаметрами, находящимися между предельным размером ступени 1 и ступенью 2, будут собираться на ударной подложке ступени 2; и так далее. Частицы, собранные на этой стадии будут иметь размеры между предельным размером ($n - 1$)й этап и тот из n й этап. После определенного периода отбора проб массу частиц, собранных на всех этапах, можно индивидуально измерить с помощью чувствительных микровесов. Исходя из скорости потока и времени отбора проб, можно определить массовую концентрацию на каждой стадии воздействия. Примером такого каскадного ударного элемента является MOUDI™ (Ударный элемент для равномерного осаждения с микроотверстием; Марпл, Рубоу и Бем, 1991). MOUDIs

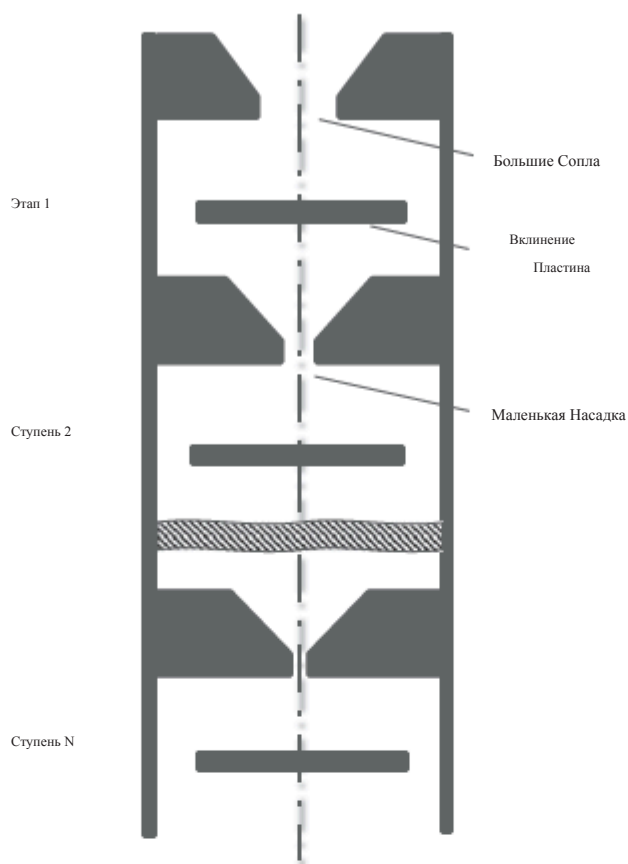


Рисунок 4.9 Принципиальная схема каскадного ударного элемента.

устройства первого поколения имеют 10 ступеней, с размерами отсекаемых частиц в диапазоне от 10 мкм для верхней ступени до 56 нм для последней ступени. Операция MOUDI требует ручного взвешивания массы частиц, собранных на отдельных этапах прессования (путем определения разницы масс подложки для прессования до и после отбора проб).

В сочетании с аэрозольным детектором реального времени могут быть разработаны новые каскадные ударные устройства для повышения скорости срабатывания прибора или увеличения динамического диапазона измерения концентрации. Один из методов заключается в объединении метода QCM с методом ударного воздействия кас-Кейда для быстрого измерения распределения массы (Чуан, 1976; Уоллес и Чуан, 1977). Два недостатка этого метода заключаются в том, что кристаллы нуждаются в частой очистке и что диапазон концентраций должен быть ограничен, чтобы избежать перегрузки кристаллических ступеней.

Проблемы, возникающие при использовании каскадного ударного элемента QCM, могут быть частично устранены за счет разработки электрического ударного элемента низкого давления (ELPI) (Кескинен, Пиетаринен и Лехтимаки, 1992). В ELPI используется диффузионное зарядное устройство для электрической зарядки отобранного аэрозоля. Затем на него можно воздействовать на этапах сбора, и заряды, переносимые сжатым аэрозолем на каждом этапе, могут быть измерены с помощью электрометров с определением тока. Ударный элемент предоставляет информацию о предельном размере, а ток - информацию о количестве и концентрации. Параллельное измерение тока ELPI обеспечивает его быструю реакцию и сокращенное техническое обслуживание по сравнению с каскадными ударниками QCM.

4.6.3 Методы, основанные на электрической подвижности частиц

Высокая электрическая подвижность субмикронных частиц в электрическом поле делает эффективным разделение и классификацию электрически заряженных частиц. Если электрическая подвижность частицы является монотонной функцией ее размера, то либо классификация частиц по размерам, либо измерение распределения по размерам может быть проведено на основе электрической подвижности частицы. 4.6.3.1 Электрические анализаторы аэрозолей (EAAs)

Широко используемым прибором для измерения распределения по размерам, использующим метод электрической подвижности, является электрический анализатор аэрозолей (ЕАА), первоначально разработанный Уитби и Кларком (1966) и усовершенствованный Лю и Пуи (1975). На рисунке 4.10 показан его рабочий принцип. Частицы, подлежащие характеристике, сначала электрически заряжаются в униполярном аэрозольном зарядном устройстве, а затем поступают в классификатор подвижности, который осаждает частицы с высокой электрической подвижностью, минуя частицы с низкой подвижностью. Предельная подвижность частиц определяется напряжением, приложенным к внутренней колонке ЕАА. Увеличивая это напряжение и измеряя соответствующий ток, переносимый заряженными частицами с помощью аэрозольного электрометра, генерируется кривая зависимости напряжения от тока, которая может быть дополнительно проанализирована для получения желаемого распределения частиц по размерам.

ЕАА имеет низкое разрешение при определении размера частиц и был заменен на сканирующий измеритель подвижности частиц с высоким разрешением (SMPS), описанный в следующем разделе.

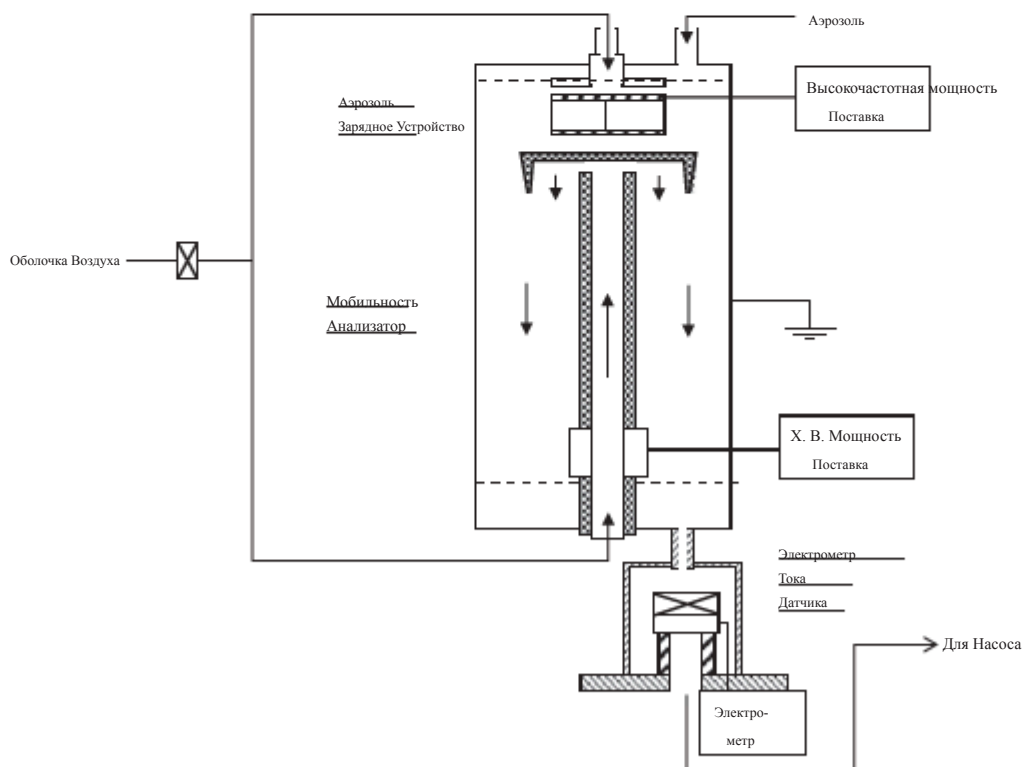


Рис. 4.10

Принципиальная схема электрического анализатора аэрозолей (ЕАА).

4.6.3.2 Дифференциальные анализаторы подвижности (DMA) и анализаторы частиц с высокой подвижностью

Дальнейшее развитие метода измерения электрической подвижности включает замену анализатора подвижности интегрального типа (т.е. ЕАА) дифференциальным.

Дифференциальный анализатор подвижности (DMA), описанный Лю и Пуи (1974) и Кнутсоном и Унтби (1975), позволяет определять размеры частиц с высоким разрешением для метода классификации подвижности. Разрешение DMA по размеру дополнительно улучшается за счет использования биполярного зарядного устройства, а не униполярного. Кнутсон (1976) был первым, кто предложил метод анализа дифференциальной подвижности биполярного заряда для измерения распределения по размерам. В то время как метод DMA позволяет определять размеры с высоким разрешением, использование аэрозольного электрометра ограничивает измерение низкой концентрации частиц из-за отношения сигнал/шум предварительного усилителя, используемого в электрометре. Точное измерение распределения частиц по размерам с помощью DMA становится возможным благодаря включению CPC (или UCPC). Коммерческий измеритель частиц с дифференциальной подвижностью (DMPS) схематично показан на рисунке 4.11. DMPS состоит из биполярного аэрозольного зарядного устройства, DMA и CPC. Платформа с микрокомпьютером и всеми необходимыми аксессуарами используется для управления прибором с целью повышения напряжения DMA, автоматическое получение CPC и применение схемы сокращения объема данных к собранным необработанным данным.

Значительный прогресс в технике DMA был разработан Вангом и Флэгганом (1990). Они использовали сканирующее электрическое поле вместо дискретного изменения электрического поля, как при традиционной работе DMPS, чтобы значительно ускорить время цикла анализатора подвижности. SMPS является коммерческим прибором, использующим этот метод сканирования. Кроме того, были разработаны портативные версии анализаторов этого типа с батарейным питанием, которые в настоящее время доступны в продаже.

Используя классификацию высокого размера и измерение распределения по размерам с помощью DMA метода, были применены тандемные установки DMA (т.е. Последовательное расположение двух DMA и установка кондиционера частиц между ними) для исследования свойств субмикронных частиц. Первый DMA используется для классификации частиц желаемых размеров и получения

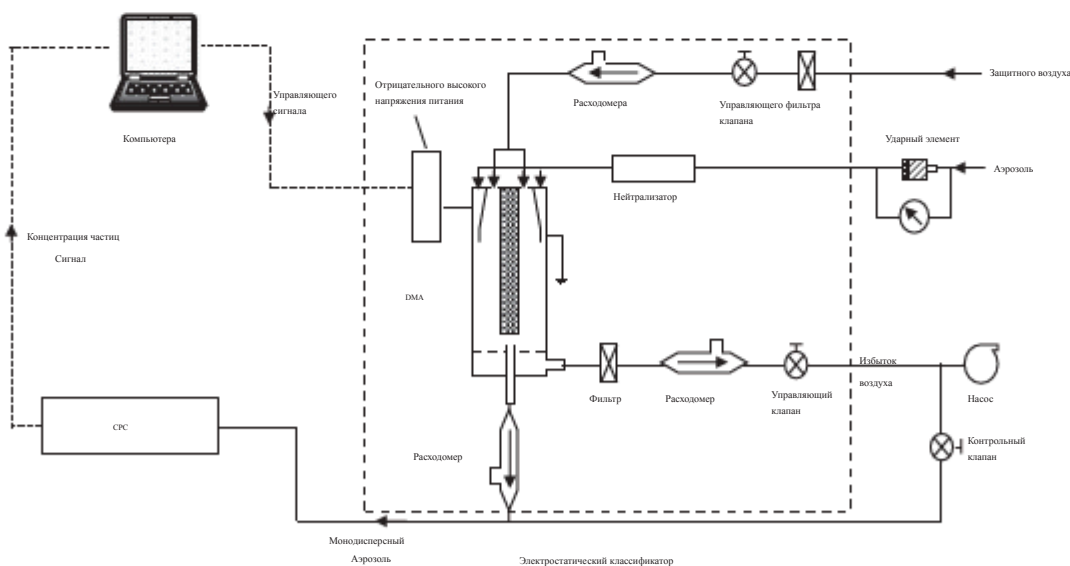


Рисунок 4.11 Конфигурация дифференциального/сканирующего измерителя подвижности частиц.

второй определяет небольшие изменения в выбранном размере частиц, вызванные кондиционером.

Liu *et al.*, (1978) использовали увлажнитель воздуха для изучения изменения размера аэрозоля серной кислоты при различных значениях влажности. Рейдер и Макмарри (1986) внесли дальнейшие усовершенствования в методику и применили его в точных исследованиях роста и испарения капель.

Наночастицы получивших в последнее время значительное внимание в силу их особого Электрического, оптических и/или магнитных свойств. Наночастицы вызывают все больший интерес у сообщества промышленной гигиены, поскольку некоторые сконструированные наночастицы предположительно являются канцерогенами. Метод DMA является ценным инструментом для исследования нанометрового аэрозоля из-за его способности измерять наночастицы с высоким разрешением и классифицировать их. Хотя вышеупомянутый DMA хорошо работает в диапазоне размеров 20-500 нм, становится все более трудно выполнять точные измерения и классификацию наночастиц диаметром менее 10 нм из-за потерь при осаждении и диффузионного уширения нанометрового аэрозоля в DMA (Kousaka *et al.*, 1986; Фиссан *et al.*, 1996). Для улучшения работы была разработана новая колонка DMA, оптимизированная для диапазона размеров наночастиц, от 2 до 150 нм (Chen *et al.*, 1998). Фернандес де ла Мора и его исследовательская группа исследовали другой способ работы DMA при высокой скорости потока в оболочке, чтобы повысить точность калибровки (Фернандес де ла Мора и де Хуан, 1998; Мартинес-Лосано и Фернандес де ла Мора, 2006). Было продемонстрировано разрешение по размеру менее 0,94% для частиц диаметром, близким к 1 нм.

Недавно в области определения характеристик субмикронных частиц были разработаны быстросебяные анализаторы частиц. Спрос на шумоглушители объясняется необходимостью и желанием охарактеризовать динамику аэрозолей, образующихся при горении, например, из выхлопных газов двигателя. Наночастицы часто выбрасываются из камер сгорания электростанций, дизельных двигателей, используемых в тяжелых грузовиках, реактивных двигателях и мусоросжигательных установках. В отличие от SMPS, анализаторы частиц с высокой подвижностью, такие как DMS (спектрометр дифференциальной подвижности; Reavell, 2002) и EEPs (анализатор частиц выхлопных газов двигателя; Mirme, 1994), используют параллельную обработку с DMA для получения быстрого времени отклика прибора. Основная схема DMS приведена на рисунке 4.12. Заряженные частицы вводятся в

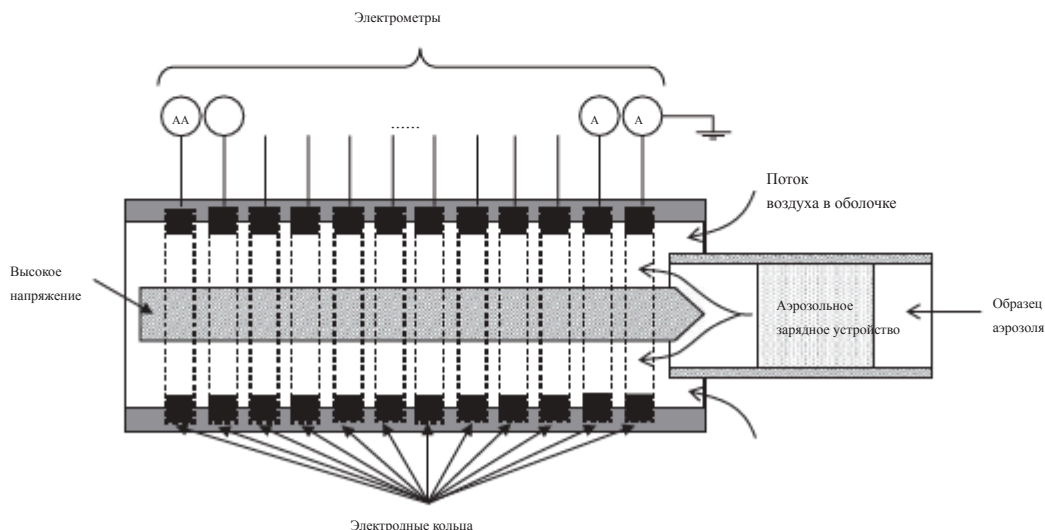


Рисунок 4.12

Принципиальная схема быстросебяющего спектрометра дифференциальной подвижности (DMS).

инструмент находится в верхней части внутренней колонки. Они дрейфуют наружу, к внешнему цилиндру, при приложении фиксированного напряжения той же полярности, что и у заряженных частиц на внутренней колонке. Множество электродов, по отдельности подключенных к чувствительному электрометру, установлены по продольной длине внешнего цилиндра для определения электрического тока осажденных частиц на электродах. В DMS используется униполярное аэрозольное зарядное устройство, тогда как в ЕЕР используются два униполярных зарядных устройства (одно для положительных ионов и тон для отрицательных ионов) для предотвращения перезаряда частиц. 4.6.3.3 Анализатор массы аэрозольных частиц (АРМ) и центробежный анализатор массы частиц Куэтта (Couette CPMA)

Другая недавняя разработка метода DMA реализована в анализаторе массы аэрозольных частиц (АРМ) (Ehara, Hagwood и Coakley, 1996) и его улучшенной версии, центробежном анализаторе массы частиц Куэтта (Couette CPMA) (Olfert and Collings, 2005; Olfert., 2006). Эти приборы измеряют отношение заряда к массе отобранного *particulate matter* (*et al*). Массы характеризуемых частиц могут быть получены, если известны электрические заряды на отдельных частицах. Базовая конфигурация таких устройств аналогична конфигурации цилиндрических DMA, но вместо неподвижных цилиндров обычного DMA АРМ имеет два вращающихся соосных цилиндра DMA (с различными угловыми скоростями). При механическом вращении и приложении напряжения в кольцевом промежутке между двумя цилиндрами DMA создаются как электростатические, так и центробежные силовые поля. При балансе электростатических и центробежных сил, действующих на частицы, только частицы с определенным отношением заряда к массе будут проходить через АРМ.

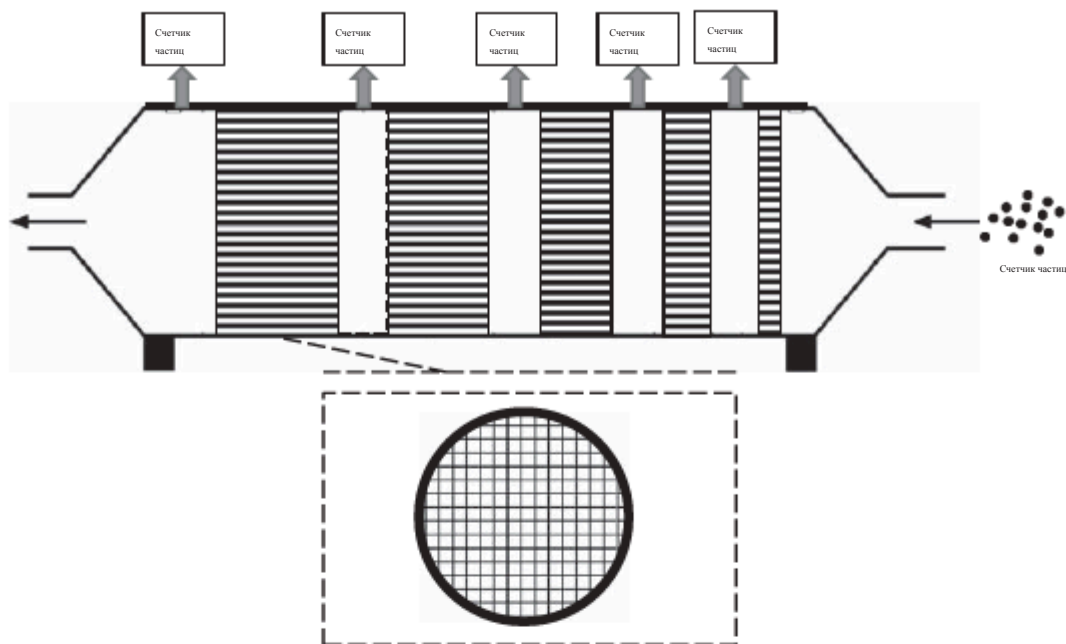
Комбинация DMA и АРМ (т.е. технология DMA- АРМ) позволяет измерять плотность частиц (McMurry *et al*, 2002; Парк *et al*., 2003a) и фрактальная размерность агрегатов (Марик и Сюй, 2004; Парк, Киттельсон и Макмюррей, 2003b).

Методы, основанные

на диффузии частиц (Джордж и Синклер, 1972; Батареи)

Поскольку скорость диффузии частиц к твердой поверхности зависит от размера частиц, для измерения распределения по размерам субмикрометрических частиц можно использовать проникновение частиц через диффузионный коллектор. Этот метод уже много лет используется для частиц размером менее 0,1 мкм (Sinclair, 1986). Простая диффузионная батарея состоит из пучка капиллярных трубок, через которые пропускается аэрозоль. Затем используется СРС для измерения концентрации аэрозоля выше и ниже пучка. Если частицы, подлежащие характеристике, электрически заряжены, для измерения проникновения можно также использовать аэрозольные электрометры. Размер частиц может быть определен на основе измерения проникновения частиц. Расположив несколько таких коллекторов последовательно, можно измерить распределение аэрозоля по размерам (Ченг, Китинг и Канапили, 1980; Йех, Ченг и Орман, 1982).

Диффузионная батарея также использовалась в качестве сепаратора частиц для отбора проб частиц по размерам (рис. 4.13). Джордж и Хинчлифф (1972) и Синклер, Джордж и Кнутсон (1977) использовали батареи для рассеивания экрана для измерения субмикронных радиоактивных аэрозолей.



Частица..... Принципиальная схема автоматической диффузионной батареи.

4.7 Измерение химического состава

Характеристика химического состава частиц на сегодняшний день в основном выполняется путем сбора частиц (либо на поверхности коллектора, либо в фильтрах) в течение определенного периода времени отбора проб и автономного анализа собранных образцов с использованием аналитических химических приборов. Из-за опасений по поводу старения частиц и потенциальных артефактов, возникающих в результате накопления частиц на фильтрах во время сбора, недавно были разработаны приборы, способные проводить непрерывный анализ химического состава частиц в режиме реального времени - в идеале в зависимости от размера частиц.

Для характеристики химического состава ансамбля частиц в диапазоне размеров, определяемом входным отверстием приборов для отбора проб, были разработаны приборы для измерения химического состава аэрозолей практически в режиме реального времени, работающие с циклом измерения от 10 до 60 минут. Например, устройство для отбора проб частиц в жидкость (PILS) использует автоматическую ионную хроматографию для количественного определения среднего содержания основных анионов или катионов в частицах (Weber, 2001). Некоторые приборы собирают ансамбли частиц, термически разлагают их и применяют газофазную хемилюминесцентную или абсорбционную спектроскопию для полунепрерывного измерения сульфата и нитрата (Штольценбург и Геринг, 2000). Другими примерами являются приборы, которые анализируют органическое и общее содержание углерода на основе сбора частиц, термического пиролиза и окисления с последующим определением диоксида углерода (Бае *et al.*, 2004; Терпин, Кэри и Хантцикер, 1990). Из-за усредняющего характера этих инструментов, работающих почти в реальном времени, ни один из них не дает существенной информации об изменении химического состава частиц в зависимости от размера частиц или полной картины общего состава частиц.

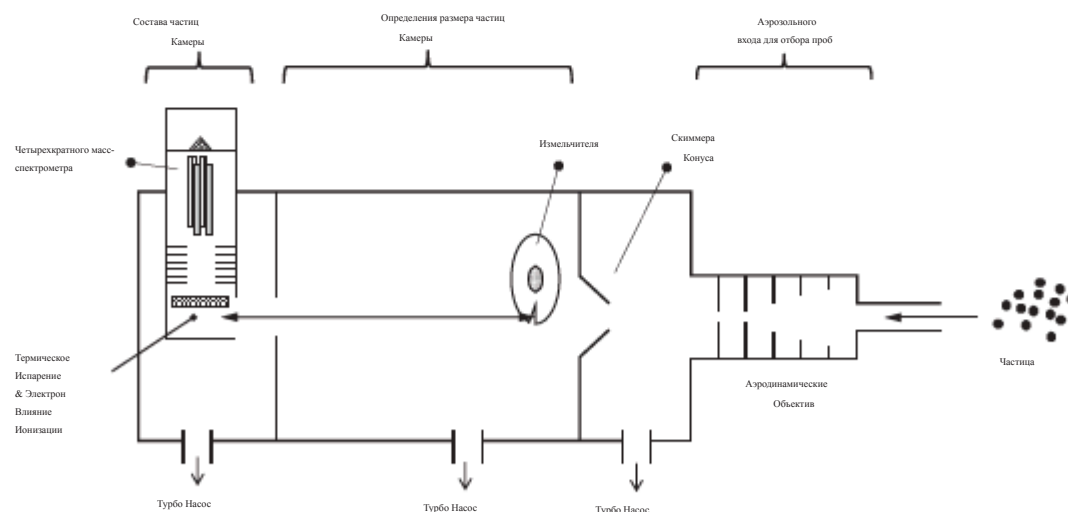
За последнее десятилетие несколько исследовательских групп добились значительных успехов в адаптации масс-спектрометрических методов для решения этой задачи. Работа, связанная с масс-спектрометрией нанесения аэрозоля, была предметом ряда обзорных статей (Коу и Аллан,

2006; Джонстон, 2006; Нобл и Пратер, 2000; Зюсс и Пратер, 1999; Салливан и Пратер, 2005). Один тип систем использует лазер как для испарения, так и для ионизации отдельных частиц, взятых из области источника масс-спектрометра. Приборы этого класса предназначены для измерений с использованием отдельных частиц. Примером может служить аэрозольный времяпролетный масс-спектрометр (ATOFMS), подробное описание которого можно найти в Gard *et al.*, (1998).

Хотя эти приборы предоставляют большой объем химической информации по отдельным частицам, существует несколько нерешенных вопросов. Из-за высоких потерь частиц во время переноса аэрозоля и чрезвычайно низкой эффективности нацеливания частиц на испарение и ионизацию репрезентативность собранных данных находится под вопросом. Другой проблемой является более низкий предел определения размера отобранных частиц. Все эти приборы используют методику рассеяния света для определения размера отобранных частиц (определение размера частиц либо по рассеянному световому сигналу, либо по времени, которое требуется частице для прохождения между двумя лазерными лучами). Методы определения размера ограничивают меньший размер до 0,2 мкм, если для определения размера частиц используется рассеянный свет. Коммерческие ATOFMS имеют нижний предел размера 0,5 мкм из-за использования метода определения размеров частиц по времени пролета. Последней проблемой является портативность, из-за важности лазерной юстировки для рабочих характеристик прибора. После перемещения инструментов часто требуется повторная юстировка. Эти проблемы привели к разработке инструментов второго класса.

Аэрозоль масс-спектрометры (Амсс) использовать термическое испарение собранных пар частиц жидкости, следуют различные методы ионизации (Аллен и Гульд, 1981; Синха *et al.*, 1982; Херн и Смит, 2004). Разделение стадий испарения и ионизации позволяет количественно определять химический состав частиц. В настоящее время коммерчески доступны четыре версии AMS (квадрупольный аэрозольный масс-спектрометр (Q-AMS), времяпролетный аэрозольный масс-спектрометр (ToF-AMS), компактный времяпролетный аэрозольный масс-спектрометр (C-ToF-AMS) и времяпролетный аэрозольный масс-спектрометр высокого разрешения (HR-ToF-AMS)).

Базовая конфигурация Q-AMS показана на рисунке 4.14. Подробное описание прибора можно найти в новаторской работе Джейн. *et al.*, (2002). Он состоит из



Принципиальная схема прибора имеется квадруольный масс-спектрометр аэрозоля- Рисунок 4.14 тромметр (Q-AMS).

три основных отделения: вход для отбора проб аэрозоля, камера определения размера частиц и камера для составления состава частиц. Каждая секция разделена критическими отверстиями и перекачивается по-разному. Сфокусированный пучок частиц формируется на входе для отбора проб путем пропускания частиц через ряд аэродинамических линз (Liu, *et al*, 1995a,b). После формирования балка поступает в калибровочную камеру (летающую трубу, поддерживаемую на $\sim 10^{-5}$ торр с помощью турбонасоса) через конус скиммера. Зависящие от размера скорости частиц, возникающие в результате расширения газа, обеспечивают средство получения аэродинамического диаметра частиц путем измерения их времени полета. Скорость частиц измеряется путем регулирования скорости вращающегося колесного измельчителя в камере и определения расстояния полета. Затем в камере обнаружения частиц выполняется определение состава частиц. Пучок частиц направляется в резистивно нагретую трубку с закрытым концом. При столкновении летучие и полунлет-кие компоненты в/на частицах испаряются. Затем молекулы пара заряжаются ионизатором электронного воздействия, установленным на входе квадрупольного масс-спектрометра. С помощью квадрупольного, настроенного на репрезентативную массу, измеряются всплески ионов. Количественная оценка становится возможной благодаря универсальному и воспроизводимому характеру электронного удара как метода ионизации, сходной (и поддающейся количественной оценке) эффективности всех неразделимых частиц и отсутствию матричных эффектов (Хименес

Более позднее повышение AMC заменяет квадрупольный масс-анализатор с компакт время-пролетного масс-спектрометра (ТОФ-АМС или C-ТОФ-АМС) (Drewnick *et al*, 2005). Хотя ТОФ-АМС-таки лучше, чем единицы массы разрешения, эта резолюция не поколения- как правило, достаточно для разделения ионов различных элементного состава при номинальном m/z . В HR-ToF-AMS, специально разработанном масс-спектрометре ToFwerk AG (платформа H-ToF, Тун, Швейцария), ортогональный времяпролетный масс-спектрометр высокого разрешения заменяет квадрупольный масс- фильтр, используемый в Q-AMS (DeCarlo *et al*, 2006).

4.8 Заключение

Находящиеся в воздухе частицы размером от 1 нм до 100 мкм представляют интерес для исследований аэрозолей и их применения. Для характеристики физических и химических свойств частиц в интересующем нас диапазоне размеров могут применяться как приборы для отбора проб аэрозоля, так и приборы прямого считывания. Приборы для отбора проб аэрозолей включают сбор частиц в пробоотборники с последующим определением характеристик в автономном режиме с помощью электромагнитных методов или аналитических химических приборов. Сбор частиц в этих приборах обычно с помощью методов инерционного воздействия, электростатического осаждения или броуновской диффузии. Ни один из отдельных методов измерения с прямым считыванием не способен охватить весь интересующий диапазон размеров частиц. Типичное эмпирическое правило заключается в том, что большинство приборов прямого считывания имеют оптимизированный для двух десятилетий диапазон размеров.

Таким образом, для характеристики физических и химических свойств частиц во всем диапазоне размеров требуются методы с различными принципами измерения. Как правило, для характеристики частиц в диапазоне размеров до супермикронметра обычно применяются принципы измерения, основанные на инерции частиц. Примерами инструментов, которые хорошо работают в этом диапазоне размеров, являются каскадные ударные устройства и APS. Методы рассеяния света часто используются для измерения частиц с размерами в супер- и субмикронметровом диапазонах. OPCs являются одним из примеров использования методов рассеяния света. Для частиц диаметром менее 1 мкм, особенно для частиц диаметром менее

500 нм, часто реализуется принцип измерения, основанный на электрической подвижности частиц.

SMPSS являются примером в диапазоне субмикронных и нанометровых размеров.

Для измерения массовой концентрации частицы могут улавливаться фильтрами, а затем подвергаться гравиметрическому взвешиванию с использованием микровесов или метода TEOM. Они также могут быть нанесены на поверхность для измерения с помощью QCMs. Для фильтрации обычно требуется длительное время отбора проб и частая очистка поверхности для QCMs. Более быстрый подход заключается в том, чтобы характеризовать массовые концентрации частиц путем измерения интенсивности светорассеяния аэрозоля и затем определять его массовую концентрацию путем калибровки. Акку-колоритный света-рассеяние метода значительно повышается, если измеренные аэрозоли имеют почти одинаковый размер и состав дистрибутивов, но различаются по концентрации. Для количественного измерения концентрации CPC могут использоваться для частиц диаметром менее 2 мкм. С современной электроникой максимальная количественная концентрация частиц, которую можно подсчитать индивидуально, составляет $10\% \cdot 10^7 \text{ #/см}^3$. OPCs может использоваться для определения размера и подсчета частиц диаметром более 0,1 мкм. Нижний предел обнаружения OPCs зависит от типов источников света (например, белого света или лазеров), используемых в счетчиках, и показателей преломления частиц. С помощью лазеров с короткой длиной волны некоторые LPC (лазерные счетчики частиц) могут обнаруживать металлические частицы диаметром до 25 нм. Для частиц диаметром менее 0,6 мкм NSAMs способны измерять концентрацию частиц на поверхности, осажденных в областях А и ТВ легких человека. Обратите внимание, что NSAM не имитирует отложение частиц в областях А и ТВ; корреляция между показаниями NSAM и рассчитанной поверхностной концентрацией частиц, осажденных в легких, полностью эмпирическая.

Для частиц размером более 0,1 мкм могут использоваться OPCS или анализаторы размера частиц с релаксацией для измерения распределения по размерам. Последние измеряют аэродинамические размеры частиц. Нижние пределы обнаружения белого света и лазерных счетчиков частиц обычно составляют 0,3 и 0,1 мкм, соответственно. Нижний предел обнаружения коммерчески доступного APS составляет 0,5 мкм. Для аэрозолей субмикронного и нанометрового размеров, для характеристики распределения частиц по размерам можно использовать DMPS (и EAA) или диффузионную батарею с низким разрешением. Чтобы проследить динамику субмикронных частиц в субсекундном масштабе времени, можно использовать датчики частиц с высокой подвижностью. Для измерения распределения частиц по размерам могут использоваться каскадные ударные устройства, разделяющие частицы в зависимости от их инерции. В сочетании с QCMs или электрометром они могут напрямую измерять распределение частиц по размерам с помощью ограниченного количества ячеек по размерам. Ударные элементы полезны для частиц в верхнем субмикронном и супермикронном диапазонах размеров, хотя нижний предел размера обнаружения таких приборов был увеличен до 30 нм.

Автономные методы (т. е. сбор частиц и последующий анализ с использованием аналитических химических инструментов) применялись при определении химического состава частиц. Значительное развитие в области измерения состава частиц сделало возможным формировать такие характеристики автоматически и непрерывно, а также непосредственно характеризовать распределение состава частиц в зависимости от размера. PILS - один из полунепрерывных приборов, используемых для выполнения этой измерительной задачи. Коммерчески доступными также стали инструменты для прямой характеристики распределения состава частиц в зависимости от размера. способный. AMS характеризует состав ансамблей частиц. ATOFMS разработан для определения характеристик частиц размером более 0,5 мкм для отдельных частиц. К сожалению, ATOFMS больше не выпускается в продаже.

Приборы для измерения частиц также были разработаны для конкретных применений. Например, для тестирования соответствия респираторов были разработаны портативные CPC. Добавление УФ-лазерного детектирования в APS позволяет обнаруживать биоаэрозоль. Разработка

СРС на водной основе очень востребован при обработке полупроводников и в чистых помещениях. Недавние достижения были достигнуты в области приборов для измерения химического состава в режиме реального времени и портативных анализаторов размеров для полевых измерений.

Список литературы

- ACGIH (2008a) Измерения наночастиц и ультрадисперсных аэрозолей. Приборы для отбора проб воздуха-Комитет по отбору проб, публикация ASI3.
- ACGIH (2008b) Калибровка пробоотборника аэрозоля. Комитет по приборам для отбора проб воздуха, публикация-публикация ASI2.
- ACGIH (2009) Стандарты эффективности и критерии отбора проб воздуха и мониторинга Инструменты. Комитет по приборам для отбора проб воздуха, публикация ASI14.
- Агарвал, Дж.К., Ремиаз, Р.Дж., Квант, Ф.Дж. *et al* (1982) Аэродинамический размер частиц в реальном времени анализатор. *Научный журнал по аэрозолям*, **13**, 222.
- Агарвал, Дж.К. и Сэм, Дж.Дж. (1980) Конденсат с непрерывным потоком, рассчитанный на количество отдельных частиц-счетчик ядер тиаона. *Научный журнал по аэрозолям*, **11**, 343.
- Аллен Дж., Гулд Р.К. (1981): Масс-спектрометрический анализатор отдельных аэрозольных частиц. *Обзор научных инструментов*, **52**: 804 - 809.
- Бэй, М.С., Шауэр, Дж.Дж., ДеМинтер, Дж. Т. *et al.* (2004) Почасовая и суточная структура частиц-фазовые концентрации органического и элементарного углерода в городской атмосфере. *Журнал Ассоциации по обращению с воздухом и отходами*, **54**, 823-833.
- Барон, П.А. (1986) Калибровка и использование аэродинамического анализатора частиц (APS-3300). *Наука и технология в области аэрозолей*, **5**, 55.
- Брикар, Дж., Делаттр, П., Мадлен, Дж., *et al.* (1976): Обнаружение сверхтонких частиц с помощью счетчика ядер конденсации непрерывного потока. В: *Мелкие частицы*, (ред. Б. Я.Х. Лю), Academic Press, Нью-Йорк, стр. 566-580. Бутчер, С.С. и Чарльсон, Р.Дж. (1972) *Введение в химию воздуха*, Академическая пресса, НЬЮ-ЙОРК.
- Чен, Б. Т., Ченг, Ю.С. и Йех, Х.К. (1984) Экспериментальные отклики двух оптических частиц-счетчики частиц. *Научный журнал по аэрозолям*, **15**, 457.
- Чен, Б.Т., Ченг, Ю.С. и Йех, Х.К. (1985) Характеристики аэродинамической частицы TSI калибровщик. *Наука и технология в области аэрозолей*, **4**, 89.
- Чен, Д.Р., Пуй, Д.Ю.Х., Хаммс, Д. *et al* (1998) Разработка и оценка нанометрового анализатор дифференциальной подвижности аэрозоля (Nano-DMA). *Научный журнал по аэрозолям*, **29**, 497.
- Ченг Ю.С., Китинг Дж.А. и Канапилли Г.М. (1980) Теория и калибровка экрана-диффузионная батарея типа. *Научный журнал по аэрозолям*, **11**, 549.
- Чуан, Р.Л. (1976) Быстрое измерение распределения частиц по размерам в атмосфере, в: *Мелких частицах*, (ред. Б. Ю.Х. Лю), Academic Press, Нью-Йорк, стр. 763-775.
- Коу, Х. и Аллан, Дж.Д. (2006) Масс-спектрометрические методы определения состава аэрозоля. измерения, в разделе *Аналитические методы измерения атмосферы* Глава 6, Издательство Блэквелла. Декарло П.Ф., Киммел Дж.Р., Тримборн А. *et al.* Поле-развертывания (2006), с высоким разрешением, времяпролетный масс-спектрометр аэрозоля. *Аналитическая Химия*. идентификатор doi: 10.1021/ ac061249n.

- Дик, У.Д., Макмарри, П.Х. и Боттиджер, Дж.Р. (1994) В зависимости от размера и состава отклик DAWN - многоугольного оптического детектора с одной частицей. *Наука об аэрозолях и технология*, **20**, 345. Дональдсон К., Ли Х.Ю. и Макни В. (1998) Опосредованный ультрадисперсными (нанометровыми) частицами повреждение легких. *Научный журнал по аэрозолям*, **29**(5-6), 553 - 560.
- Древник, Ф., Хингс, С.С., ДеКарло, П. *et al.* (2005) Новый времяпролетный аэрозольный масс-спектрометр (TOF-AMS) - описание прибора и первое применение в полевых условиях. *Аэрозоль Наука и технология*, **39**, 637 -658. Эхара К., Хагвуд К. и Коукли К.Дж. (1996) Новый метод классификации частиц аэрозоля. - *Журнал аэрозольной науки*, **27**, 217-234.
- Энгилмез, Н. и Дэвис, С.Н. (1984) Исследование потери частиц при диффузии в ядре конденсации Нолана-Поллака. 177-181. *Научный журнал по аэрозолям*, **15**, 509-510.
- Fernández de la Mora, J. and de Juan, L. (1998) Анализ размеров наночастиц с высоким разрешением- частицы и ионы: запуск венского DMA почти оптимальной длины при числах Рейнольдса 5000-40000. *Журнал по аэрозолям*, **29**, 617- 626.
- Иванов, И.И., Киселев, А.А., Киселев, Д., Стратанович, Д. *et al* (1996) Экспериментальное сравнение четырех различных- анализаторы ферментативной подвижности для нанометровых измерений аэрозолей. *Наука об аэрозолях и технология*, **24**, 1.
- Фиссан Х., Ноймани С., Трампе А. *et al* . (2007) Обоснование и принцип работы прибора измерения площади поверхности наночастиц, нанесенных на легкие. *Журнал исследований наночастиц*, **9**, 53-59.
- Гард, Э.Э., Климан, М.Дж., Гросс, Д.С. *et al*(1998) Прямое наблюдение гетерогенных химический состав атмосферы. *Наука*, **279**, 1184 - 1187.
- Джордж, А.К. и Хинчлифф, Л. (1972) Измерение концентрации несоединенного дочернего радона в добыча урана. *Медицинская физика*, **23**(6), 791 - 803.
- Херн, Дж.Д. и Смит, Г.Д. (2004) Метод химической ионизационной масс-спектрометрии для онлайн-анализ органических аэрозолей. *Аналитическая химия*, **76**, 2820 - 2826.
- Геринг С. и Штольценбург М.Р. (2005) Метод увеличения размера частиц водой конденсация в ламинарном термодиффузионном потоке. *Наука и технология в области аэрозолей.*, **39**, 428-436. Геринг С., Штольценбург М.Р., Квант Ф.Р. *et al.* (2005) Конус на водной основе с ламинарным потоком- счетчик плотных частиц (WCPC). *Наука и технология аэрозолей*, **39**, 659 - 672.
- Джейн, Дж.Т., Лирд, округ Колумбия, Чжан, Х. *et al.* (2002) Разработка масс-спектрометра аэрозоля- для анализа размера и состава субмикронных частиц. *Наука об аэрозолях и технология*, **33**, 49-70. Хименес, Дж.Л., Джейн, Дж.Т., Ши, К. *et al.* (2003) Отбор проб окружающего аэрозоля с помощью аэрозольный масс-спектрометр. *Журнал геофизических исследований*, **108**(D7), 8425. doi: 8410.1029/2001JD001213.
- Джонстон, М.В. (2006) Отбор проб и анализ отдельных частиц методом масс-спектрометрии аэрозоля- трометрия. *Журнал масс - спектрометрии*, **35**, 585-595.
- Кескинен Дж., Пиетаринен К. и Лехтимаки М. (1992) Электрический ударный элемент низкого давления. *Научный журнал по аэрозолям*, **23**, 353.
- Кестон Дж., Рейнекинг А. и Порстендорфер И. (1991) Калибровка TSI модели 3025 счетчик сверхтонких ядер конденсации. *Наука и технология в области аэрозолей*, **15**, 107.

- Ким, Ю.Дж. и Боутман, Дж.Ф. (1990) Поправки к калибровке размера для активного рассеяния аэрозольного спектрометра (ASASP-100X). *Наука и технология аэрозолей*, **12**, 665.
- Кнутсон Э.О. (1976) Расширенный метод электрической подвижности для измерения размера и концентрации аэрозольных частиц в *Мелких частицах*, (ред. Б. Ю.Х. Лю), Нью-Йорк: Академическая пресса, стр. 739-762. Кнутсон Э.О. и Уитби К.Т. (1975) Классификация аэрозолей по электрической подвижности: apparatus, теория и приложения. *Научный журнал по аэрозолям*, **6**, 443.
- Косака Ю., Ниита Т., Окаяма К. *et al* (1982) Разработка конденсационного типа-счетчик ядер насыщения. *Научный журнал по аэрозолям*, **13**, 231.
- Косака Ю., Окаяма К., Адачи М. *et al* (1986) Влияние броуновской диффузии на электрификацию-компьютерная классификация ультрадисперсных аэрозольных частиц в анализаторе дифференциальной подвижности. *Журнал химической инженерии Японии*, **19**, 401.
- Кулкарни П., Барон П.А. и Виллеке К. (2011) *Измерение аэрозоля - принципы, технология-рекомендации и приложения*, 3-е издание, John Wiley & Sons, Inc, Хобокен, Нью-Джерси.
- Лю, Б. Я.Х., Берглунд, Р.Н. и Агарвал, Дж. К. (1974) Экспериментальные исследования оптических параметров-счетчики времени. *Атмосферное окружение*, **8**, 717.
- Liu, B.Y.H. and Pui, D.Y.H. (1974) Субмикронный стандарт аэрозоля и первичная абсолютная калибровка счетчика ядер конденсации.-низкая калибровка счетчика ядер конденсации. *Научный журнал по коллоидам и интерфейсам*, **47**, 155. Лю, Б.Я.Х. и Пуи, Д.Я.Х. (1975) О характеристиках электрического анализатора аэрозолей. *Научный журнал по аэрозолям*, **6**, 249.
- Лю, Б. Я.Х. и Пуи, Д.Я.Х. (1981) Входные отверстия для отбора проб аэрозолей и вдыхаемых частиц. *Атмосферная сферическая среда*, **15**, 589 -600.
- Лю, Б.Я.Х., Пуи, Д.Я.Х., Уитби, К.Т. *et al*. (1978) Хроматограф подвижности аэрозолей: новый детектор аэрозолей серной кислоты. *Атмосферная среда*, **12**, 99.
- Лю, Б. Я.Х.; Шимански, В.В. (1987) Эффективность подсчета, нижний предел обнаружения и уровень шума уровни оптических счетчиков частиц. Материалы 33-го ежегодного технического совещания, Институт наук об окружающей среде, Сан-Хосе, Калифорния. Лю, Б.Я.Х., Шимански, В.В. и Пуи, Д.Я.Х. (1986) Реакция лазерных оптических частиц противостоит прозрачным и светопоглощающим частицам. *Транзакции ASHRAE*, **92**, 1.
- Лю, П., Зиemanн, П.Дж., Киттельсон, Д.Б. *et al*. (1995a) Генерация пучков частиц регулируемых размеров расходимость: I. Теория движения частиц в аэродинамических линзах и расширения сопел. *Наука и технология аэрозолей*, **22**, 293-313. Лю П., Зиemanн П.Дж., Киттельсон Д.Б. *et al*. (1995b) Генерация пучков частиц контролируемого размера и расходимость: II. Экспериментальная оценка движения частиц в аэродинамических линзах и расширениях сопел. *Наука и технология в области аэрозолей*, **22**, 314-324.
- Лундгрен Д.А., Картер Л.Д. и Дейли П. С. (1976) Измерение массы аэрозоля с использованием пьезоэлектрических кристаллических датчиков, в *Мелких частицах* (ред. Б.Ю.Х. Лю), Academic Press, Нью-Йорк. Марик, М.М. и Сюй, Н. (2004) Эффективная плотность и фрактальная размерность сажи раг-частицы от предварительно смешанного пламени и выхлопных газов автомобилей. *Научный журнал по аэрозолям*, **35**, 1251- 1274.
- Марпл В.А., Рубоу К.Л. и Бем С.М. (1991) Однородный осадок с микроотверстиями Ударный элемент (MOUDI): описание, калибровка и применение. *Наука и технология в области аэрозолей*, **14**(4), 434-446.

- Мартинес-Лозано, П. и Фернандес де ла Мора, Дж. (2006) Улучшения разрешения а нанодометр, работающий трансзвуковым образом. *Научный журнал по аэрозолям.*, **37**, 500 - 512.
- Мазумдер, М.К. и Кириш, К.Дж. (1977) Анализ времени аэродинамической релаксации одиночной частицы-анализатор. *Обзор научных инструментов*, **48**, 622.
- Макдермотт, У.Т., Оккович, Р. К. и Штольценбург, М.Р. (1991) Эффективность подсчета улучшенный счетчик ядер конденсации на 30 А. *Наука и технология аэрозолей*, **14**, 278.
- Макмерри П.Х., Ванг Х., Парк К. *et al* (2002) Взаимосвязь между массой и мобильностью-плотность атмосферных частиц: новый метод измерения плотности частиц. *Аэрозоль Наука и технология*, **36**, 227-238. ван дер Мейлен, А. и ван Эльзаккер, Б.Г. (1986) Размерное разрешение лазерных оптических счетчиков частиц. *Наука и технология аэрозолей.*, **5**, 313.
- Мирме, А. (1994) Электроаэрозольная спектрометрия. Докторская диссертация. Тартуский университет.
- Благодарный, А. С. Пратер, А. К. (2000) в реальном времени один масс-спектрометр частиц: в Тихом-ческих комментариев четверть века химического анализа аэрозоля. *Масс - Спектрометрия Отзывы*, **19**, 248-274.
- Нун К.Дж. и Ханссон Х.К. (1990) Калибровка ядра конденсации TSI 3760 счетчик для нестандартных условий эксплуатации. *Наука и технология в области аэрозолей*, **13**, 478.
- Обердорстер Г. (1996) Значение параметров частиц при оценке зависимости экспозиции от дозы-реакции вдыхаемых частиц. *Наука и технология о твердых частицах*, **14**(2), 135 - 151. Олферт Дж.С. и Коллингс Н. (2005) Новый метод классификации частиц по массе - центробежный масс-анализатор частиц Соц-ette. *Научный журнал по аэрозолям.*, **36**, 1338-1352. Олферт Дж.С., Ривелл К.С., Раштон М.Г. *et al*. (2006) Экспериментальная функция переноса-описание центробежного масс-анализатора частиц Куэтта. *Научный журнал по аэрозолям.*, **37**, 1840-1852.
- Пандис С.Н., Балтенспергер У., Вольфенбаргер Дж.К. *et al* . (1991) Инверсия данных по аэрозолю с эпифаниометра. *Научный журнал по аэрозолям.*, **22**, 417 - 428.
- Пак К., Цао Ф., Киттельсон Д.Б. *et al*. (2003a) Взаимосвязь между массой частиц и подвижностью частиц выхлопных газов дизельных двигателей. *Наука и технология в области охраны окружающей среды.*, **37**, 577-583.
- Парк К., Киттельсон Д.Б. и Макмюррей П.Х. (2003b) Завершающее исследование аэрозольной массы измерение концентрации: сравнение значений, полученных с помощью фильтров и путем прямого измерения распределения массы. Паташник Х.и. *Environmental Health Perspectives*, **94**(1980), **37**, 1223- 1230.
- Новый прибор для мониторинга массы аэрозоля в режиме реального времени-улучшение: ТЕОМ, в разделе *Материалы: достижения в области отбора проб и измерения частиц* EPA-600/9-80-004 (ред. В.Б. Смилх) Агентство по охране окружающей среды США, стр. 264. Рейдер, Д.Дж. и Макмарри, П.Х. (1986) Применение анализа тандемной дифференциальной мобильности.-лизер для изучения роста или испарения капель. *Научный журнал по аэрозолям.*, **17**, 771.
- Ривелл К. (2002) Определение спектров размеров твердых частиц в реальном времени и эмиссии параметры с помощью спектрометра дифференциальной подвижности.
- Международная конференция ЕТН по измерению наночастиц. Сакве, Б.А., Дик, В.Д. и Макмарри, П.Х. (1995) Проводят различие между сферическими и несферическими частицами путем измерения изменчивости азимутального рассеяния света. *Наука и технология в области аэрозолей*, **23**, 373.

- Sachweh, B., Umhauer, H., Ebert, F. *et al.* (1998) Оптический счетчик частиц In situ с улучшенной коррекцией ошибок совпадения для количественных концентраций до 107 частиц см-3. *Научный журнал по аэрозолям.*, **29**, 1075. Солт К., Ноубл К. и Пратер К.А. (1996) Аэродинамический размер частиц в зависимости от света измерения интенсивности рассеяния как методы определения размеров частиц в реальном времени в сочетании с времяпролетной масс-спектрометрией. *Аналитическая химия*, **68**, 230.
- Г.Дж. и Цурубаяси К. (1975) Новый датчик массы для измерения вдыхаемой пыли. *Журнал Американской ассоциации промышленной гигиены*, **36**, 791.
- Сэм Дж. г., Tsurubayashi, K. и Хомма, К. (1977) производительность пьезоэлектрический микровесов вдыхаемых аэрозольных датчика. *Американская Ассоциация Промышленной Гигиены Журнал*, **38**, 580. Шин, В.Г., Пуи, Д.Ю.Х., Фиссан, Х. *et al.* (2007) Калибровка и численное моделирование монитора площади поверхности наночастиц (модель TSI 3550 NSAM). *Журнал исследований наночастиц*, **9**, 61-69. Сильва, П.Дж. и Пратер, К.А. (1997) Оперативная характеристика отдельных частиц из автомобильные выбросы. *Наука и технология в области охраны окружающей среды*, **31**, 3074.
- Синклер Д. (1986) Измерение нанометровых аэрозолей. *Наука и технология в области аэрозолей.*, **5**, 187.
- Синклер Д., Джордж А.К., Натсон Э.О. (1977) Применение диффузионных батарей для измерения-гарантии субмикронных радиоактивных аэрозолей. 1977 - Зимнее совещание по радиоактивности в воздухе, Сан-Франциско, Калифорния, декабрь 1977г. Синклер Д. и Юэ П.С. (1982) Счетчик ядер конденсации в непрерывном потоке, II. *Аэрозоль Наука и техника*, **1**, 217.
- Синха, член парламента, Гиффин, генеральный директор, Норрис, доктор медицинских наук. *et al.* (1982) Анализ частиц методом масс-спектрометрии. *Журнал науки о коллоидах и границах раздела.*, **87**, 140 - 153.
- Штольценбург М., Геринг С.В. (2000) Метод автоматизированного измерения содержания мелкодисперсных частиц нитрат в атмосфере, *Наука и технология в области охраны окружающей среды*, **34** (5): 907-914. Штольценбург М.Р. и Макмарри П.Х. (1991) Ультрасчетчик. *Наука и технология аэрозоля*, **14**, 48.
- Зюсс, Д.Т. и Пратер, К.А. (1999) Масс-спектрометрия аэрозолей. *Химические обзоры*, **99**, 3007.
- Салливан, Р. К. и Пратер, К.А. (2005) Недавние достижения в нашем понимании атмосферы-химия сферы и климата стали возможными благодаря инструментам для анализа аэрозолей в режиме онлайн. *Аналитическая химия*, **77**, 3861-3886. Сильвия Х.В. и Пратер К.А. (1998) Методы времяпролетной масс-спектрометрии для реального временной анализ отдельных частиц аэрозоля. *Тенденция в аналитической химии*, **17**, 346.
- Шимански, В.В. и Лю, Б.Я.Х. (1986) О точности определения размеров лазерных оптических частиц счетчики. *Характеристика частиц и систем частиц*, **3**, 1.
- Шимански, В.В.; Шиндлер, С. (1998) Характеристики отклика нового двухоптического частичного-спектрометра. Материалы 5-го Международного конгресса по определению размеров оптических частиц, Миннеаполис, Миннесота, 10-14 августа 1998 г., стр. 219-220. Терпин, Б.Дж., Кэри, Р.А. и Хантзикер, Дж.Дж. (1990) Анализатор на месте с временным разрешением для определения органического и элементарного углерода в аэрозолях. *Наука и технология в области аэрозолей*, **12**, 161-171.
- Винсент, Дж.Х. (2007) *Отбор проб аэрозоля: стандарты, приборы и области применения*, John Wiley & Sons, Ltd, Чичестер.

- Ваггонер А.П. и Чарльсон Р.Дж. (1976) Измерение оптических параметров аэрозоля в виде *Мелких частиц* (ред. Б. Я.Х. Лю), Academic Press, Нью-Йорк.
- Уоллес Д. и Чуан Р. (1977) *Каскадный ударный прибор с использованием кварцевого кристалла-Чувствительные элементы микровесов для исследования распределения частиц по размерам в режиме реального времени*, Специальная публикация 464, Национальное бюро стандартов США, Вашингтон, Округ Колумбия, стр. 199.
- Ван, С.К. и Флэган, Р.К. (1990) Сканирующий спектрометр электрической подвижности. *Аэрозоль Наука и технология*, **13**, 230.
- Вебер, Р.Дж., Орсини, Д., Даун, Ю.Н. *et al.* (2001) Коллектор для преобразования частиц в жидкость для быстрого измерения объемного химического состава аэрозоля. *Наука и технология в области аэрозолей*, **35**, 718-727.
- Вен Х.Ю. и Каспер Г. (1986) Эффективность подсчета шести коммерческих счетчиков частиц. *Научный журнал по аэрозолям*, **17**, 947-961.
- Уитби, К.Т. и Кларк, У.Э. (1966) Электрический подсчет частиц аэрозоля и распределение по размерам-измерительная система для диапазона размеров от 0,015 до 1 мкм. *Теллус*, **18**, 573.
- Ву, К., Чен, Д.Р., Пуй, Д.И.Н. *et al.* (2001) Использование непрерывных измерений интегральных параметров аэрозоля для оценки площади поверхности частиц. *Наука и технология в области аэрозолей*, **34**, 57-65.
- Йех, Х.К., Ченг, Ю.С. и Орман, М.М. (1982) Оценка различных типов проволоки экраны как элементы диффузионной батареи. *Журнал науки о коллоидах и интерфейсах*, **86**, 12.
- Чжан З.К. и Лю Б.Ю.Х. (1990) Зависимость производительности TSI 3020 от-счетчик ядра уплотнения для измерения давления, расхода и температуры. *Наука об аэрозолях и технология*, **13**, 493.

Механизмы фильтрации

Сара Даннетт

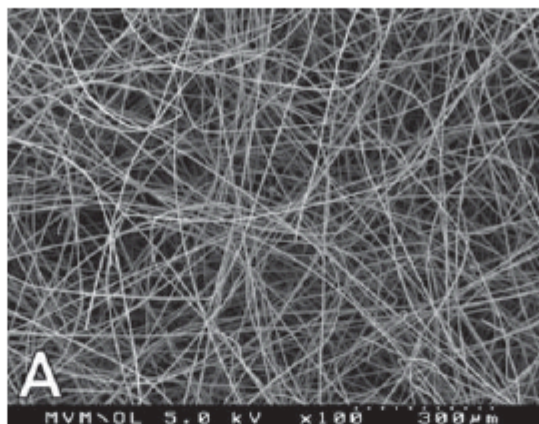
*Факультет авиационной и автомобильной инженерии,
Университет Лафборо, Великобритания*

5.1 Введение

Фильтрация может быть определена как процесс отделения частиц из газового (обычно воздушного) потока с помощью пористой среды. Потребностей в таком процессе много; например, во многих рабочих средах люди подвергаются воздействию вредных частиц, и поэтому должна быть обеспечена защита. Это может быть крупномасштабный промышленный фильтр или средства индивидуальной защиты, такие как респираторные фильтры. Некоторые отрасли промышленности, включая фармацевтический и электронный секторы, полагаются на чистый воздух исключительного качества, который обеспечивается за счет фильтрации. Это также относится к медицинскому сектору, где борьба с инфекцией имеет решающее значение.

Фильтрация также может улучшить качество воздуха в домах, на рабочих местах, в школах и на транспорте.

Существует два основных типа фильтрации: поверхностная фильтрация и глубинная фильтрация. При поверхностной фильтрации частицы собираются на проницаемой поверхности; по мере накопления осадка он образует корку на фильтре, что увеличивает сопротивление потоку. Глубинная фильтрация удаляет частицы как с поверхности, так и по всей глубине среды. Один из наиболее важных типов глубинных фильтров состоит из волокон. Такие фильтры состоят из прокладок из волокон в виде открытой трехмерной сетки. Пористость высокая, обычно от 70 до 99%. Пример такого фильтра показан на рис.5.1. Из-за своей высокой пористости волокнистые фильтры обычно обладают низким сопротивлением течению. Газ проходит через открытую структуру фильтра, и взвешенные в нем частицы оседают на волокнах. Из-за расстояний между волокнами любая захваченная частица вряд ли войдет в контакт более чем с одним волокном, и, следовательно, моделирование характеристик фильтра часто проводится с использованием теории одного волокна.



Изображение фильтра из нержавеющей стали под сканирующим электронным микроскопом. Воспроизведено с помощью Рисунок 5.1 разрешение Хейма и др. (2005). Авторское право © 1995. Маунт-Лорел, Нью-Джерси. Перепечатано с разрешения.

В дополнение к волокнистым фильтрам существуют и другие сажевые фильтры, такие как гранулированные фильтры, тканевые фильтры и мембранные фильтры. Гранулированные фильтры состоят из уплотненных слоев частиц и широко используются в системах водоснабжения и канализации. Они подробно описаны в Tien and Ramarao (2007). Тканевые фильтры изготавливаются из текстильных волокон, которые перерабатываются в относительно уплотненную форму. Большая часть пыли не проникает внутрь материала, а задерживается на поверхности. Мембранные фильтры изготавливаются из перфорированного материала или сильно уплотненного волокнистого материала, что обеспечивает более низкую пористость, чем у волокнистых фильтров. Они имеют тенденцию действовать главным образом за счет поверхностной фильтрации.

Волокнистые фильтры являются наиболее важным типом фильтров для отбора проб аэрозолей из-за их способности обеспечивать высокую эффективность разделения при относительно низком перепаде давления. Иногда используются электростатические взаимодействия между частицами и волокнами, которые повышают производительность фильтра. Фильтры, изготовленные из постоянно заряженных волокон, стали известны как "электреты". В этой работе кратко излагаются основные факторы, влияющие на производительность волокнистых фильтров, и проводится обзор значительной работы в этой области.

Для оценки производительности фильтра используются два основных параметра: эффективность сбора E , и проникновение, P . Первый используется, когда фильтры используются для извлечения твердых частиц или когда твердые частицы собираются для анализа. Это относится к доле частиц, поступающих в фильтр, которые задерживаются:

$$E = \frac{N_{in} - N_{out}}{N_{in}} \quad (5.1)$$

где N_{in} и N_{out} - количество частиц, поступающих в фильтр и покидающих его соответственно.

Проникновение важно при рассмотрении качества воздуха. Оно относится к доле частиц, попадающих в фильтр и выходящих обратно.:

$$P = \frac{N_{out}}{N_{in}} = 1 - E \quad (5.2)$$

Проникновение монодисперсного аэрозоля через гомогенные фильтры большой глубины X может быть дано по $P = e^{-\gamma X}$ (Хиндс, 1999), где γ - эффективность слоя. Эффективность этого слоя равна

связано с эффективностью использования одного волокна, η , которое представляет собой отношение количества фактических частиц, удаленных волокном, к количеству, которое было бы удалено 100% эффективным волокном, по (Hinds, 1999):

$$\eta = \frac{\gamma \pi d_f}{\alpha A} \quad (5.3)$$

α представляет собой долю заполнения фильтра, которая представляет собой долю воспринимаемого объема, где фильтр фактически занят волокнами, и d_f представляет собой диаметр волокна. Следовательно, эффективность волокнистого фильтра толщиной X связан с эффективностью использования одного волокна за счет:

$$E = 1 - P = 1 - \exp \left[- \frac{\alpha \eta X}{\pi d_f} \right] \quad (5.4)$$

Трудность применения уравнения 5.4 заключается в том, как определить значение эффективности одного волокна, η . Это было предметом многих предыдущих исследований и обсуждается в разделах 5.2.2 - 5.2.6. Эта эффективность зависит от механизма, с помощью которого частицы осаждаются на волокне.

5.2 Механизмы осаждения

Целью фильтрации является удаление вредных аэрозолей из газа, поэтому эффективность механизмов осаждения аэрозолей на поверхности, содержащихся в фильтре, имеет фундаментальное значение для его использования. В таблице 5.1 приведен довольно полный набор возможных механизмов, включая условия, при которых они эффективны, и типы фильтров, в которых они используются. Альтернативами фильтрам, включенным в таблицу 5.1, использование которых для удаления частиц обычно ограничено крупномасштабными операциями, являются центрифуги, используемые в пылесосах, и электрофильтры, используемые на крупных промышленных предприятиях. Всесторонний теоретический анализ большинства механизмов приведен в работе Уильямса и Лоялки (1991). Последние четыре механизма, перечисленные в таблице, обычно непрактичны для фильтрации. В случае термодиффузии требуется создание большого температурного градиента, поскольку аэрозольные частицы будут перемещаться к более низким температурам из-за более энергичных столкновений с молекулами на их высокотемпературных сторонах, что приведет к осаждению. В фильтрах это непрактично. Для диффузидиффузии, конденсации паров и роста частиц также требуется температурный градиент к поверхности фильтра для образования конденсата. В случае барботажного осаждения в жидкостях разделение газового потока на мелкие пузырьки, проходящие через жидкость, имело бы преимущество в простом удалении аэрозольных частиц, осаждаемых различными механизмами на стенках пузырьков во время их прохождения. Однако проблема может возникнуть из-за аэрозоля, образующегося в результате лопания пузырьков при их выходе из жидкости.

Из-за этих ограничений основными механизмами, с помощью которых фильтры удаляют аэрозольные частицы из потока жидкости, являются первые пять, перечисленные в таблице: (i) диффузия, (ii) перехват, (iii) инерционное воздействие, (iv) гравитационное осаждение и (v) электростатическое притяжение. Этот обзор будет посвящен этим механизмам и их применению в волокнистых фильтрах.

Первые четыре представляют собой механические механизмы захвата, которые работают без влияния сил притяжения между частицами и волокнами. Диффузионное осаждение важно для мелких частиц, броуновское движение которых заставляет их отклоняться от линий потока и вступать в контакт с фильтром. Важны перехват и инерционное воздействие

Механизмы осаждения и использование фильтров. Таблица

5.1 Механизм или процесс		Тип фильтра
Диффузия	Менее эффективен - мелкие частицы	Волокнистые фильтры
Перехват	Частицы среднего размера	Керамические фильтры при высокой температуре
Инерционное соударение	Частицы большого размера или меньшего размера в высокоскоростном ускоренном потоке	Волокнистые фильтры
Гравитационное осаждение	Очень крупные или тяжелые частицы	Волокнистые фильтры
Электростатическое притяжение	Определяется зарядом; наиболее эффективен для частиц малого или среднего размера с градиентом температуры до поверхности	Центрифуги На практике неэффективны Электретные фильтры Электростатические осадители
Термофорез	температуры до поверхности	Не используется на практике
Диффузиофорез	Конденсация пара на поверхности требуется небольшое	На практике не используется
Конденсация пара и рост частиц	Увеличенный размер частиц для упрощения удаление	Используется для удаления частиц наблюдение, но не при фильтрации, может быть эффективным при
Барботаже жидкостей	Зависит от вторичного механизма для достижения стенок пузырьков	маленькие пузырьки

для более крупных частиц. Перехват происходит, когда частицы следуют по линиям течения потока и проходят близко к волокну фильтра. Инерционное соударение происходит, когда частицы отклоняются от линии потока из-за их инерции и воздействия на волокно.

Гравитационное осаждение только значительных для тех, частицы которых скорость оседания больше, чем конвективные скорости потока через фильтр и, следовательно, ограничена очень большие или тяжелые частицы. В фильтрах, сконструированных из заряженных волокон, присутствует дополнительный механизм осаждения: электростатическое притяжение. Эти пять механизмов схематично показаны на рисунке 5.2.

Чтобы

понять эффективность фильтров для различных механизмов осаждения частиц, важно получить хорошее представление о потоке, проходящем через них.

В разделе 5.2.1 рассматриваются модели течения, разработанные для описания поля

течения, и их сравнение с результатами экспериментальных измерений. В следующих разделах поочередно рассматриваются различные механизмы осаждения

5.2.1

Модели течения Теоретически можно рассчитать скорость, с которой частицы осаждаются непосредственно на поверхности

волокон, решив соответствующие уравнения движения. Однако, поскольку поток внутри

фильтра сложный, это невозможно без упрощений. Жидкость, текущая через

фильтр, может рассматриваться как непрерывная до тех пор, пока препятствия на ее пути велики по сравнению со

средней длиной свободного пробега молекул жидкости. Это условие выполняется, если число Кнудсена

, Kn , ничтожно мал:

$$Kn, H. = \frac{\lambda}{d} \quad (5.5)$$

где λ - длина свободного пробега молекул жидкости.

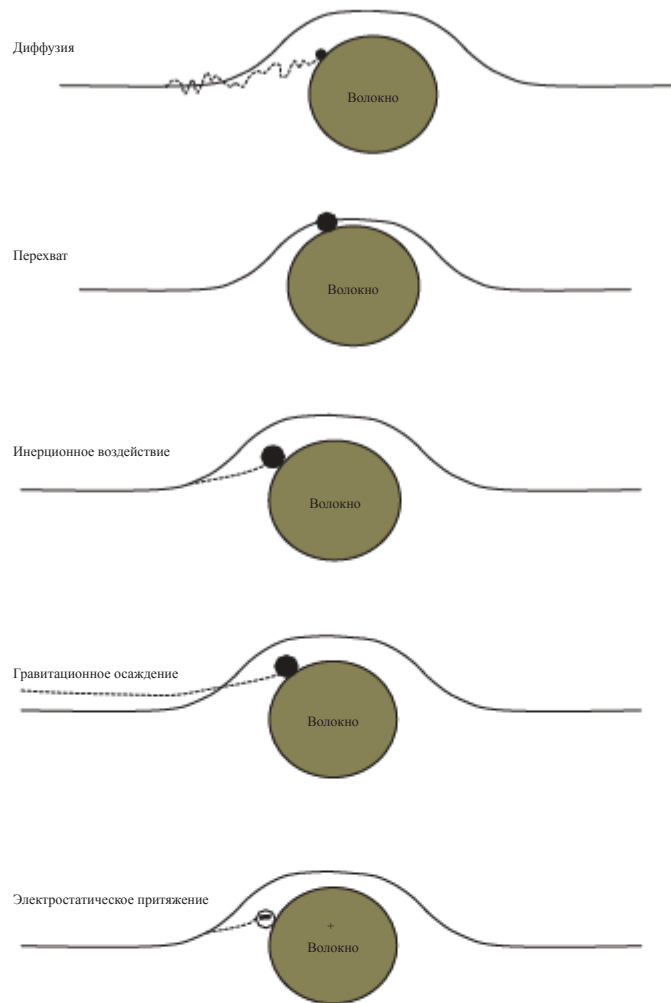


Рисунок 5.2 Пять механизмов нанесения.

В большинстве фильтров, $K_n \ll 1$, и, следовательно, можно предположить, что жидкость является непрерывной. Например, при нормальных условиях в воздухе, λ составляет 0,065 мкм, и, следовательно, условие равно удовлетворяется для волокнистых фильтров при условии, что волокна не имеют субмикронного размера.

Другим важным параметром при изучении потока жидкости через фильтры является число Рейнольдса, Re :

$$Re = \frac{\rho U_0 d_f}{\mu} \quad (5.6)$$

где ρ и μ являются плотностью и вязкостью жидкости и U_0 - это его средняя скорость. Этот параметр, Re , представляет собой соотношение сил инерции и вязкости жидкости, и в теории фильтрации он обычно невелик. Например, для воздуха, проходящего через волокнистый фильтр с волокнами диаметром 10 мкм со скоростью 0,1 м/с, значение Re составляет приблизительно 0,065. Это показывает, что в потоке преобладает вязкость жидкости. Следовательно, в теории фильтрации предполагается

обычно образуется незначительный пожар. Затем уравнения движения, описывающие поток жидкости, задаются формулой:

$$\mu \nabla^2 \nabla U = - \nabla U = 0 \quad (5.7)$$

где p это давление жидкости. Чтобы решить эти уравнения, большинство аналитических и численных исследований в теории фильтрации были основаны на ячеечных моделях течения жидкости (Brown, 1993). В этих моделях, фильтр 3D структуры, в которой волокна случайным образом, Дис-, принесенными аппроксимируется 2Д регулярно шахматном порядке нитей, как показано на рис. 5.3.

В двух измерениях уравнение 5.7 может быть записано в терминах потоковой функции,

ψ , как:

$$\nabla^4 \psi = 0 \quad (5.8)$$

Шестиугольная ячейка, показанная на рис. 5.3, аппроксимируется круглой ячейкой. Решения уравнения 5.8 вида:

$$\psi(r, \theta) = A_1 \left(\frac{1}{r^3} + A_2 r + A_3 r \ln r + A_4 r^3 \right) \sin \theta \quad (5.9)$$

в ячейке были получены Кувабарой (1959) и Халпелем (1959), где A_n 's

зависят ли константы от

α разница между двумя моделями заключается в

граничном условии, применяемом к границе ячейки. Эксперименты, проведенные Киршем и Фуком (1967), показали, что эти модели дают точное описание поля течения вблизи волокна, причем модель Кувабары является наиболее точной. Этот подход к клеточной модели имеет

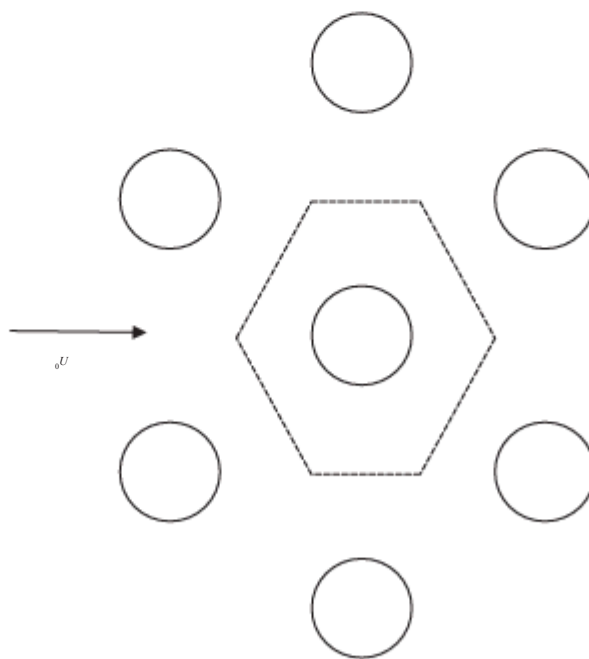


Рисунок 5.3

Модель набора волокон в шахматном порядке.

широко применяется в теории фильтрации; см., например, Асгарян и Ченг (2002), Кириш (2005), Рейнор (2008), Даннетт и Клемент (2009) и Черняков, Кириш и Кириш (2011). Однако из-за сделанных допущений такие подходы имеют свои ограничения; например, все пространство фильтра не может быть покрыто круглыми ячейками, и следовательно, описание потока, отводимого от волокон, является плохим. Поэтому были разработаны другие модели; см., например, Кириша (2006) и Хеллу, Мартинеса и Эль Езиди (2004), которые включили в решение уравнения 5.8 члены более высокого порядка, чем те, которые взяты в уравнении 5.9. В последние годы, с ростом мощности компьютеров, все более широкое распространение получили вычислительные модели гидродинамики (CFD). Этот метод позволяет, в принципе, моделировать любую структуру фильтра, поскольку по всему фильтру может быть создана сетка, а уравнения движения жидкости аппроксимированы в дискретных точках сетки. Однако, как правило, из-за вычислительных требований метода изучаются простые решетчатые структуры. Например, когда Ли и Маршалл (2007) моделировали поток через двумерный массив цилиндрических волокон, использование CFD позволило учитывать потоки с коэффициентом Re до $O(1)$. Ван и Пуй (2009) использовали CFD для моделирования расположенного в шахматном порядке массива эллиптических волокон. В исследовании, проведенном Цянем, Чжаном и Хуангом (2009), поле расхода фильтра с расположенными в шахматном порядке волокнами и различной объемной долей твердого вещества моделировалось с использованием CFD. В работе Вана .

et al

(2006), виртуальная трехмерная волокнистая структура фильтра была сгенерирована на основе информации, полученной в результате анализа микроскопических изображений фильтрующей среды и поля течения, полученного внутри фильтра с использованием CFD. Также были получены экспериментальные результаты эффективности фильтра, которые, как было обнаружено, находятся между результатами, полученными с помощью модели CFD, и результатами, полученными с использованием модели Kuwabara cell. В Maze *et al.* (2007), аналогичный подход был принят для изучения характеристик фильтров, состоящих из нановолокон, работающих при пониженном давлении. Возмущением поля течения, вызванным волокнами, пренебрегли. В исследовании Джаганатана, Тафреши и Пурдейхми (2008) было проведено CFD-моделирование микроструктуры реальной волокнистой среды. Для получения 3D-изображения фильтра использовалось цифровое объемное изображение. В недавнем исследовании, проведенном Хоссейни и Тафреши (2010), 2D случайные волокнистые геометрии были сгенерированы численно, и их эффективность была определена с использованием CFD. Они были сравнены с результатами 3D, полученными в исследованиях Вана *et al.* (2006). Хотя за последние годы вычислительная мощность значительно возросла, она по-прежнему чрезмерна для 3D моделирования, что вполне может помешать проведению обширных исследований.

Эффективным альтернативным подходом, введенным для определения расхода в фильтрах Филипповой и Ханель (1997), является метод решетки-Больцмана, который представляет собой дискретный вычислительный метод, основанный на аппроксимации уравнения Больцмана. Показано, что этот метод эффективно моделирует обтекание сложной геометрии с низким уровнем горения. Он был принят Пшекопом, Москалем и Градоном (2003) для описания структуры осажденных твердых частиц в фильтрах и Пшекопом и Градоном (2008) для рассмотрения фильтрации наночастиц.

Как только поток через фильтр понят, можно изучать поведение частиц в этом потоке. Как упоминалось ранее, существует пять основных механизмов осаждения частиц, которые важны для фильтрации. Теперь они, в свою очередь, будут рассмотрены для чистого фильтра. Различные механизмы обычно рассматриваются отдельно для удобства изучения, но в действительности некоторые из механизмов будут действовать одновременно. Однако, в зависимости от ситуации, вероятно, что один из механизмов будет доминирующим. Эффективность по одному волокну, была подробно изучены все механизмы осаждения. Самый простой способ оценить, когда важно более одного механизма, - это предположить, что вклад от

7

7

различные механизмы являются аддитивными (Рамарао, Тьен и Мохан, 1994):

$$\eta = \eta_D + \eta_R + \eta_G + \eta_G + \eta_{EL} \quad (5.10)$$

где η_D , η_R , η_G и η_{EL} эффективны ли одноволоконка за счет диффузии, перехвата-инерционного воздействия, гравитация и электростатическое осаждение соответственно.

Альтернативный и более точный подход заключается в предположении, что проникновение аэрозоля, $1 - \eta$, является ли продукт проникновения благодаря различным механизмам:

$$1 - \eta = (1 - \eta_D)(1 - \eta_R)(1 - \eta_G)(1 - \eta_{EL}) \quad (5.11)$$

При численном рассмотрении проблемы возможно включить все механизмы в модели и, следовательно, определяют η напрямую (Рамарао, Тьен и Мохан, 1994; Oh *et al.*, 2002). Полученные таким образом результаты показали, что для частиц среднего размера существует связь между броуновской диффузией и инерционным соударением (Рамарао, Тянь и Мохан, 1994).

5.2.2 Диффузионное осаждение

Как указано в таблице 5.1, этот механизм важен для мелких частиц, которые из-за лобового движения не следуют за линиями течения потока и могут диффундировать из потока к волокнам и осаждаться. Интенсивность броуновского движения увеличивается для более мелких частиц и, как следствие, возрастает эффективность удаления. В этом случае безразмерная концентрация частиц, n , определяется безразмерным уравнением Фоккера - Планка (Фукс, 1964):

$$\frac{\partial n}{\partial t} + U \nabla n = \frac{1}{Pe} \nabla^2 n \quad (5.12)$$

где Pe это число Пекле, которая является мерой относительной величины диффузионных движения частиц и конвективного движения воздуха мимо волокна:

$$Pe = \frac{U d}{D} \quad (5.13)$$

где D является коэффициентом диффузии частиц.

В этом случае эффективность для одного волокна определяется как:

$$\eta_D = \frac{2(1+R) \int_0^\pi \frac{\partial n}{\partial r} \bigg|_{r=r_1} d\theta}{Pe} \quad (5.14)$$

где R является параметром перехвата, $R = \rho d / d_f$ и $r_1 = 1 + R$.

Точное решение уравнения 5.12 найдено не было, но, предполагая, что поле потока Кувабары, заданное уравнением 5.9, и принимая диффузионный слой вокруг волокна за небольшой, Ли и Лю (1982) обнаружили, что оно задается формулой: η_D

$$\eta_D = A \frac{[1 - \alpha]^{1/31}}{Ku} Pe^{-1/32} \quad (5.15)$$

где Ku является гидродинамическим фактором течения в Кувабаре:

$$\alpha$$

$$(5.16) \quad Ku = -0.5 \ln - 0.75 + \alpha - 0.25 \alpha^2$$

и A - это константа, которая составляла 2,6 в исследовании Ли и Луи и, как было обнаружено, 2,9 в других (Brown, 1993). Это выражение было проверено экспериментально. Полуэмпирическое уравнение 5.15 применимо к режиму непрерывного течения, когда Ku , заданный уравнением 5.5, незначителен. Когда диаметр волокна, d , имеет ту же величину, что и средний свободный пробег жидкости молекулы, влияние скользящего потока должно быть принято во внимание при оценке в этом случае выражение для d^2 дается Пайе *et al.* (1992) (Уравнение 5.17), которое согласуется лунка с результатами экспериментов для частиц размером 80-400 нм и диаметром волокна 1 мкм:

$$d^2 = 1.6 \frac{\alpha [L]^{1/31}}{Ku} \frac{Pe}{C_{13} C_2} \left(1 - \frac{1}{Ku} \right)^{1/31} \quad (5.17)$$

$$C_2 = \frac{1}{1 + 1.6 \frac{Pe}{Ku} C_{13}} \quad C_1 = 1 + 0.388 Ku \cdot H^{1/2} Pe C_{13}$$

Недавно был проведен ряд исследований эффективности фильтров с субмикронными частицами, в том числе одно, проведенное Цянем, Чжаном и Хуангом (2009), которые численно определили эффективность фильтра для различных условий эксплуатации и обнаружили, что броуновская диффузия играет важную роль.

значительная роль для частиц с диаметром частиц, $d_p < 0.2$ мкм. Диффузионное отложение-

определение полидисперсного аэрозоля было аналитически рассмотрено Квоном, Кимом и Ли (2002), которые получили выражения для эффективности фильтров. В исследовании CFD, проведенном Хоссейни и Тафреши (2010), было рассмотрено влияние соотношения диаметров волокон и частиц на эффективность фильтрации. Было обнаружено, что соотношение диаметров волокон и частиц является важным фактором, влияющим на эффективность фильтрации. Было и не был важен. Поскольку некруглые волокна могут работать лучше, чем круглые, из-за их увеличенной площади поверхности, Вангом и Пуи (2009) было проведено численное моделирование для исследования эффективности эллиптических волокон с одним волокном. Они обнаружили, что длинные и тонкие волокна работают лучше для частиц, в которых преобладает эффект диффузии. Также было проведено численное исследование Киршем (2007, 2011); в статье 2007 года моделировалось осаждение субмикронных частиц в модельном фильтре с волокнами, покрытыми пористыми оболочками, а в статье 2011 года рассматривался 3D-фильтр.

В последние годы фильтрация наночастиц ($d_p < 100$ нм) стали важной проблемой, поскольку они получают все более широкое распространение, например, в виде выбросов при сжигании.

По мере уменьшения их размера частицы начнут вести себя все больше как молекулы, и отскок от волокон может стать значительным. Предыдущая теория с одним волокном предполагала, что частицы прилипают к волокну при ударе, и поэтому важны нижние границы размера частиц, для которых справедлива эта теория. Работы Хейма *et al.* (2005), Япунтич *et al.* (2007), Ким, Харрингтон и Пуи (2007) и Ван, Чен и Пуи (2007) обнаружили, что теория эффективности с одним волокном предсказывает эффективность фильтра вплоть до частиц размером всего 2,5 нм. Влияние полидисперсных фильтров на фильтрацию наночастиц рассматривалось Подгорски (2009), Подгорски, Майссером и Владиславом (2011) и Ямадой, Такафуми и Есио (2011), которые обнаружили, что классическая теория значительно недооценивает проникновение в данном случае. Было проведено исследование влияния формы частиц на эффективность для частиц

в диапазоне размеров 50-300 нм от Boskovic *et al.* (2008), которые сочли это важным при низкой скорости контакта фильтра с поверхностью, но в меньшей степени по мере увеличения скорости.

По мере увеличения размера частиц относительно толщины диффузионного слоя вокруг волокна эффект перехвата частиц волокном будет усиливаться. Было обнаружено (Стечкина и Фукс, 1966; Даннетт и Клемент, 2009), что это может быть охарактеризовано

параметр $s = R/\delta$, где δ представляет собой безразмерную толщину диффузионного слоя вокруг волокна. Диффузия доминирует при $s < 1$ и перехват для $s > 1$.

5.2.3 Осаждение путем перехвата

Осаждение путем перехвата происходит в результате конечного размера частиц. Как указано в таблице 5.1, это справедливо для частиц среднего размера, которые обладают незначительной инерцией, гравитационным осаждением и броуновским движением и, следовательно, следуют линиям течения. Осаждение происходит, когда поток, называемый "предельным потоком", проходит в пределах одного радиуса частицы волокна. Если y - расстояние от центральной линии, на котором ограничивающая линия тока входит в область решения, то эффективность одного волокна из-за перехвата может быть получена из:

$$\frac{2y_c}{d} = \frac{K_{i1}}{K_{i2}} \quad (5.18)$$

Используя поле потока Кувабары, Кувабара (1959) и Ли и Лю (1982) получили

$$\text{выражение для } K_{i1} = \frac{2 \ln(1 + R)}{1 + R} = 2 \ln(1 + R) - 1 + \frac{1}{1 + R} - \frac{1}{(1 + R)^2} \quad (5.19)$$

где K_{i1} - гидродинамический коэффициент течения Кувабары, определенный в уравнении 5.16.

Поле потока Кувабары, используемое для определения уравнения 5.19, предполагает, что волокна в фильтре расположены в шахматном порядке таким образом, что они отделены друг от друга одинаковыми расстояниями по горизонтали и вертикали. Лю и Ван (1997) модифицировали уравнение 5.19, включив в него эффекты расположения волокон. Характеристики эллиптических волокон для частиц в режиме перехвата были исследованы Рейнором (2008), который обнаружил K_{i1} зависимости от вида волокна соотношение и ориентация оси волокна по отношению к потоку, а также на R и α . Захват волокнистого аэрозоля путем перехвата был исследован Асгаряном и Ченгом (2002), которые

установлено, что перехват является единственным механизмом потери для $ST_m < 0.2$, где модифицированный Стоксов число, ST_m , задается с помощью $ST_m = \frac{ST}{2Ku}$. Число Стокса, ST , - отношение частиц $2Ku$ тормозной путь зависит от диаметра волокна и определяется по формуле:

$$ST = \frac{d_p^2 \rho U C_0}{18 \mu d_f} \quad (5.20)$$

где C является поправочным коэффициентом Каннингема, который необходим из-за аэродинамического скольжения на поверхности частицы:

$$C = 1 + \frac{22}{d_p} \left[1.246 + 0.42 \times e^{-0.44d_p} \right] \quad (5.21)$$

Для больших значений ST_m , было обнаружено, что перехват нельзя рассматривать отдельно от воздействия.

5.2.4 Осаждение из-за инерционного удара

Для частиц, для которых броуновская диффузия пренебрежимо мала, общее безразмерное уравнение движения сферической аэрозольной частицы задается уравнением 5.22:

$$ST \frac{dU}{dt} = U - U - N_g y_{\text{ш}} \quad (5.22)$$

где U — это скорость частицы, ST и N_g являются ли безразмерные параметры связанными с важностью инерции и силы тяжести при переносе частиц соответственно, и $y_{\text{ш}}$ является единицей вектора в направлении, в котором действует сила тяжести.

Гравитационный параметр N_g представляет собой отношение скорости оседания частиц, V к среднему фильтрует скорость, U_0 :

$$N_g = \frac{V}{U_0} = \frac{d^2 \rho C g}{18 \mu U_0} \quad (5.23)$$

где g — ускорение под действием силы тяжести.

Если ST и N_g несли оба они незначительны, то уравнение 5.22 дает $U = U_0$; то есть частицы следуют по линиям течения жидкости, и, следовательно, механизмом осаждения является перехват (см. Раздел 5.2.3). Соотношение ST и N_g это число Фруда, Фр:

$$FR = \frac{ST}{N_g} = \frac{U_0^2}{\rho \cdot z} \quad (5.24)$$

Если $FR \gg 1$, то гравитационные эффекты пренебрежимо малы по сравнению с инерцией, и уравнение 5.22 упрощается до:

$$ST \frac{dU}{dt} = U - U \quad (5.25)$$

Это уравнение не имеет общего решения из-за сложности U , и, следовательно, нет общего аналитического выражения для эффективности осаждения одного волокна в результате инерционного осаждения. Однако были предложены выражения для предельных случаев малых и больших значений ST (Brown, 1993):

$$\eta = \frac{J_0}{(2Ku)^2} \quad \text{для небольших } ST \quad (5.26)$$

$$\eta = 1 - \frac{k}{St} \quad \text{для больших } ST \quad (5.27)$$

где $J_0 = 0,0111 R^{0,62}$, $K = 0,4$ и $0,0035$ являются постоянными, которые зависят от поля расхода; это $0,805$ для поля расхода Кувабары, с $\alpha = 0,05$.

При умеренных значениях ST , были получены эмпирические формулы с подобранными коэффициентами (Brown, 1993):

$$\eta = \frac{ST \times a^{33}}{(ST^{3,3} a + 0,177 + \frac{K_1}{Pe} + \frac{K_2}{Pe})}, \quad a = 1 + K_1 \alpha^{2+K_2} \quad (5.28)$$

Параметры $K_1 - K_4$ были сопоставлены методом наименьших квадратов с экспериментальными данными и приведены в виде (Нгуен и Бикманс, 1975):

$$K_1 = 37, K_2 = 91, K_3 = 12, K_4 = 60, \quad \text{для модельного фильтра}$$

$$K_1 = 4, K_2 = 2250, K_3 = 4, K_4 = 65 \quad \text{для настоящего фильтра}$$

Ван и Пуй (2009) получили численные результаты для больших ST и сравнил их с Уравнение 5.27, поиск согласия, которое было бы полезно для $ST \gg 1$. Совсем недавно аналитическое выражение-значение для η было получено для ситуации $R \ll \alpha^{1/2}, ST \ll 1$ автор: Чжу, Линь и Чунг (2000):

$$\eta = \frac{\frac{\alpha}{2(1-\alpha)}}{K_{11}} C m R + \frac{(1-\alpha)}{K_{11}} ST^2 \quad (5.29)$$

Ван и Пуй (2009) численно рассмотрели эффективность фильтрации эллиптическими волокнами для комбинированных эффектов перехвата и инерционного осаждения и обнаружили, что тупые и почти круглые волокна лучше всего подходят для частиц в этом режиме.

5.2.5 Гравитационное осаждение

Влияние силы тяжести на эффективность фильтрации зависит от направления воздушного потока и может способствовать увеличению или уменьшению осаждения. В общем случае скорость оседания частицы под действием силы тяжести, V , будет иметь тенденцию к увеличению осаждения, тогда как средняя конвективная скорость жидкости через фильтр, U_0 , будет иметь тенденцию переносить частицы мимо волокна. Относительная величина этих двух скоростей, η , обычно равна эффективности одного волокна из-за гравитационного осаждения, (Brown, 1993):

$$\eta = \frac{G}{U_0} \quad (5.30)$$

В целом, этот механизм невелик по сравнению с другими, за исключением случаев, когда частицы большие или тяжелые и U_0 является низким. Когда U_0 при скорости, превышающей примерно 0,1 м/с, соударение, как правило, более важно, чем оседание.

Кирш (2005) обнаружил, что важно учитывать влияние силы тяжести при определении радиуса наиболее проникающей частицы при рассмотрении диффузионного осаждения тяжелых субмикронных частиц.

5.2.6 Электростатическое Осаждение

Отложение механизмы, рассматриваемые в пунктах 5.2.2 -5.2.5 не предполагают какого-либо притяжения сил между частицами и волокнами. Одним из методов, применяемых для усиления этих механизмов, является использование электростатических сил. Это особенно полезно для частиц среднего размера, где основным механизмом механического осаждения является перехват. Эффективность фильтрации в этой области минимальна из-за слабости броуновского движения частиц и инерции частиц. С добавлением электростатических сил фильтр

может достичь определенной эффективности при более низкой фракции набивки и, следовательно, более низком сопротивлении потоку воздуха в фильтре. Фильтры, состоящие из постоянно заряженных волокон, стали известны как "электретные фильтры" и обычно используются для очистки воздуха, которые требуют высокой эффективности и низкого перепада давления (Romain, Liu and Chae, 1998).

Когда волокна фильтра заряжены, в дополнение к механизмам осаждения, рассмотренным в разделах 5.2.2 - 5.2.5, осаждение частиц происходит из-за поляризационных сил. Электрическое поле волокна индуцирует в частице диполь, сила которого зависит от объема частицы и диэлектрической проницаемости составляющего ее материала. Поскольку электрическое поле уменьшается с удалением от волокна, сила притяжения на отрицательной части индуцируемого диполя превышает силу отталкивания на положительной части, в результате чего частица притягивается волокном. Для противоположно заряженных частиц этот механизм усиливается кулоновскими силами. Эффективность механизма осаждения зависит от отношения скорости дрейфа, V , который перемещает частицу к волокну, к конвективной скорости потока, который стремится переместить частицу мимо волокна. Следовательно, все электростатические фильтры более эффективны при низких скоростях фильтрации. Скорость дрейфа частицы является произведением действующей на нее электростатической силы и ее механической подвижности и определяется как:

$$V = \frac{qE}{3\pi\mu r} \quad (5.31)$$

где q является суммарным зарядом частицы и E является электрическим полем, обусловленным зарядом на волокне. В ранних работах по электростатическому осаждению обычно предполагалось, что волокна заряжены равномерно, но детали методов, используемых для зарядки фильтров, предполагают, что это не так. Более сложные конфигурации заряда, таким образом, были рассмотрены, таких как bipolarly заряженных волокон (Подгорского и Balazy, 2008). Обзоры работ по характеристикам чистых фильтров приведены Брауном (1993) и Вангом (2001).

Безразмерный параметр, N_{SUB} , представляющий собой отношение скорости дрейфа к поверхности волокна. к скорости свободного потока, U_0 , используется для описания эффективности улавливания. Нижний индекс sub связан с зарядом на волокне и частицах. В следующих выражениях для N_{SUB} предполагается, что поправочный коэффициент Каннингема равен единице.

5.2.6.1 Равномерно заряженные волокна

Предполагая, что фильтрующее волокно имеет равномерный заряд Q на единицу длины, тогда:

$$N_{Qq} = \frac{Qq}{\pi^2 \epsilon_0 d_p d U_0} \quad \text{для заряженных частиц с зарядом } q$$

$$N_{Q0} = \frac{Q^2 d_p d}{\pi^2 \epsilon_0 \mu d_j^3 U_0} \frac{D_p}{r^{D+2}} - 1 \quad \text{для нейтральных частиц} \quad (5.32)$$

где ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость свободного пространства, 10^{-12} Фарад на метр (F/m), и ϵ_p является диэлектрической проницаемостью материала частиц (Brown, 1993).

Было показано, что эффективность использования одного волокна за счет электростатического осаждения в этих двух случаях равна:

$$\eta_{Qq} = \pi^2 N_{Qq} \quad \text{предполагая, что между частицей и волокном действуют только кулоновские силы}$$

$$\eta_{00} = \begin{cases} \pi N_{00} & \text{для небольших } \eta_{00} \\ \frac{\pi^3 N_{00}^2}{2} & \text{для больших } \eta_{00} \end{cases} \quad (5.33)$$

Эмпирическое выражение для η_{00} было получено для $0.03 N_{00} < \eta_{00} < 0.91$ с использованием Поле потока Кувабары с $\alpha = 0.03$ (Brown, 1993):

$$\eta_{00} = 0.84 N_{00}^{0.75} \quad (5.34)$$

5.2.6.2 Волокна с неоднородным зарядом

В реальных фильтрах заряд на волокне, как правило, неравномерен. Хотя расчет электрических полей из-за сложных реальных конфигураций заряда является сложным, были смоделированы некоторые упрощенные ситуации. Например, если волокно несет линейный дипольный заряд с учетом распределения поверхностного заряда σ_{θ} , тогда

$$\eta_{\sigma q} N = \frac{\sigma q}{3 \pi \epsilon_0 (1 + \frac{D_f^2}{r_p^2} U^2)} \quad \text{для заряженных частиц с зарядом } q$$

$$\eta_{\sigma 0} N = \frac{\sigma^2 r_p^2}{3 \pi \epsilon_0 (1 + D_f)^2 U_0^2} \frac{D_f^{D_f+1}}{D_f+2} \quad \text{для нейтральных частиц} \quad (5.35)$$

где D_f является диэлектрической проницаемостью волокнистого материала. Соответствующие выражения для эффективности одного волокна приведены в (Brown, 1993):

$$\eta_{\sigma q} = \begin{cases} 0.17 N_{\sigma q}^{-0.93} = 0.59 K_{\sigma q} & \text{для } 0.1 < N_{\sigma q} < 10 \\ N_{\sigma 0}^{0.4} = 0.54 K_{\sigma 0}^{0.6} & \text{для } 1 < N_{\sigma 0} < 100 \end{cases} \quad (5.36)$$

Экспериментальные результаты Ромэ, Лю и Чэ (1998), полученные на трех коммерчески доступных волокнистых электретенных фильтрах для повышения эффективности работы с одним волокном, были сопоставлены со степенными функциями N ; было обнаружено, что для заряженных частиц показатель $N_{\sigma q}$ находился между 0,69 и 0,9, а для незаряженных частиц показатель степени N варьировался от 0,38 до 0,48, соглашаясь с прогнозами Брауна (1993).

Выражение для нейтральных частиц позже было расширено на значения для потока Кувабары (см. Kim *et al.*, 2005):

$$\eta_{\sigma 0} = \begin{cases} 1.48 N_{\sigma 0}^{0.93} & \text{за } 10^{-4} < N_{\sigma 0} < 10^{-2} \\ 0.51 K_{\sigma 0}^{0.35} & \text{за } 10^{-2} < N_{\sigma 0} < 1 \end{cases} \quad (5.37)$$

Совсем недавно Подгорски и Балази (2008) численно смоделировали случай нейтральных частиц и сопоставили свои данные для получения двух выражений для η_{o0} :

$$\eta_{o0} = \frac{0.771 N_{o0}}{1 + 0.973 (Ku H)_{o0}^{0.785}} \quad \text{за } 10^{-3} < N_{o0} < 10^3$$

$$\eta_{o0} = \frac{N_{o0}^{0.740} 0.528 Ku^{0.63}}{1 + 0.366 (Ku H)_{o0}^{0.63}} \quad \text{для } 5 \times 10^{-3} < N_{o0} < 10^3 \quad (5.38)$$

Первое уравнение считается более точным для наночастиц фильтруется в слабо заряженный электранный медиа и второе уравнение для промежуточного сила электростатического взаимодействия и частицы размером более 0,3 мкм.

5.2.6.3 Нейтральное волокно, заряженные частицы

В этом случае безразмерный параметр, описывающий захват частиц, задается формулой:

$$\eta_q N = \left(\frac{D_f - 1}{D_f + 1} \right) \frac{q^2}{\pi^2 12 \mu_0 \epsilon_0 U_f \partial d^2} \quad (5.39)$$

и эффективность использования одного волокна за счет:

$$\eta_q \eta = \frac{2}{\pi^2 Ku} N_{oq}^{0.5} \quad (5.40)$$

Экспериментальное исследование Хуана *et al.* (2006) исследовали улавливание четырех различных типов аэрозольных частиц при различных условиях заряжения.

5.2.6.4 Внешние Электрические поля

Эффективность использования одного волокна может быть повышена путем помещения волокна во внешнее электрическое поле, E .

В этом случае волокно поляризовано, и на любые частицы, проходящие через него, будут воздействовать как

внешнее электрическое поле и поле поляризации. Выражения для N и η для нейтральных частиц приведены в Brown (1993) и воспроизведены здесь:

$$N_{pq} = \frac{\text{Уравнение}}{3 \pi \mu \partial Y}$$

$${}_{p0} N = \frac{2(pD - 1)(D_f - 1)d^2}{\mu U 3(pD + 2)(D_f + 1)d} \frac{E^2 p_0 \epsilon}{\quad} \quad (5.41)$$

где E это величина электрического поля.

$$\eta_{pq} = \frac{N_{pq}}{N_{pq} + 1} \left(\frac{D_f - 1}{D_f + 1} + 1 \right)$$

$${}_{p0} \eta = \frac{{}_{p0} N}{2} \quad (5.42)$$

Торпом и Брауном (2003) было проведено экспериментальное исследование использования внешних электрических полей с помощью фильтров из текстильного волокна для улавливания частиц микрометрового размера.

5.2.6.5 Комбинации электростатических и механических воздействий

Эффективность электростатического фильтра с прямоугольными волокнами была экспериментально изучена Канаока *et al.* (1987) для случаев, в которых важны механизмы электростатической и броуновской диффузии. Были получены эмпирические выражения для эффективности одного волокна для заряженных и незаряженных частиц:

$$\begin{aligned} \eta &= 1.07Pe^{-1/32} + 0.06N_{00}^{0.4} && \text{незаряженные частицы} \\ \eta &= 1.07Pe^{-1/32} + 0.06N_{00}^{0.4} \cdot (0.75 + 0.067N_{00} - 0.017(N_{00}N_{00})^{0.5}) && \text{заряженные частицы} \end{aligned} \quad (5.43)$$

Существует некоторая неопределенность в отношении коэффициентов в этих уравнениях (Brown, 1993) из-за сделанных предположений. Однако показатели согласуются с теорией.

Численное моделирование, включая механические и электростатические эффекты, было недооценено компанией Oh *et al.* (2002), Цао, Чунг и Ян (2004) и Чунг, Цао и Ян (2005). В работе над *et al.* (2002), Предполагалось поле потока Кувабары, и волокна были равномерно заряжены, в то время как Цао, Чунг и Ян (2004) и Чунг, Цао и Ян (2005) рассматривали прямоугольные волокна с биполярным зарядом.

5.3 Факторы, Влияющие на эффективность

5.3.1 Отскок частиц

Выражения, приведенные для однослойной эффективности в этой главе, предполагают, что частицы прилипают к волокнам при контакте, но в некоторых ситуациях частицы отскакивают от поверхности волокна и, следовательно, остаются не захваченными. Принимая во внимание отдачу, эффективность использования одного волокна, η_{re} является произведением эффективности столкновения (эффективности при условии, что все частицы, которые сталкиваются, прилипают) и эффективности или вероятности адгезии, h :

$$\eta_{re} = \eta \cdot h \quad (5.44)$$

η обсуждается ли эффективность использования одного волокна в разделах 5.2.2 - 5.2.6; то есть делается предположение, что $h \approx 1$. Это предположение справедливо только для частиц диаметром от примерно 10 нм до нескольких микрометров, где диффузия и перехват являются основными механизмами осаждения (Ван и Каспер, 1991). Для более крупных частиц отскок после удара снижает эффективность, а для частиц меньшего наноразмерного размера отскок происходит в результате скорости теплового удара. Этот процесс отскока отличается от повторного захвата, при котором осажденные частицы удаляются из волокна из-за действующих на них сил сопротивления или в результате бомбардировки частицами, находящимися в воздухе.

В случае отскока эффективность адгезии зависит от скорости удара частиц, V_a . Частица отскочит от поверхности, если V_a больше критического значения, заданного:

$$V_a = \frac{[(2\Phi - e^2)]^{0.5}}{a^2} \quad (5.45)$$

Уравнение 5.45 справедливо, когда энергия сцепления приближающейся частицы такая же, как и у отскакивающей частицы. Если энергия адгезии отскакивающей частицы намного больше энергии сближения, то $1 - e^2$ в числителе заменяется на e^2 (Браун, 1993).

В уравнении 5.45 Φ - энергия адгезии, m - масса частицы, a - коэффициент восстановления, коэффициент восстановления. Из-за большого количества неизвестных величин, присутствующих в описании h , таких как e и Φ , большинство выражений в литературе носят эмпирический характер. Одно из наиболее общепринятых взято из работы Ptak и Jaroszcyk (1990) и действительно для $0.4 \text{ Re} \leq 5.75$:

$$h = \frac{190}{(18ST^2 + 190)^{0.68}} \quad (5.46)$$

4.82 (Рембор, Маус и Умхауэр в экспериментальном исследовании на одном волокне для 0,4 Ст 1999 г.) было обнаружено, что уравнение 5.46 завышает h в 6 раз больше. Более поздний опыт умственной работы (Каспер *et al.*, 2009), для одиночных волокон размером 8, 20 и 30 мкм и $0.4 \text{ ST} \leq 9$ полученный:

$$\begin{aligned} h_{8\mu\text{m}} &= \frac{ST^{-3}}{ST^{-3} + 2.1ST^{-2}} \cdot Pe^{0.503} \\ h_{20/30\mu\text{m}} &= \frac{ST^{-3}}{ST^{-3} + 0.0365Pe^{2.46}} \cdot + 1.91 \end{aligned} \quad (5.47)$$

Компания Klouda рассмотрела эффективность фильтра из нетканого металла *et al.* (2011) для $U_0 = 10 \text{ м/с}$ и сравнивается с выражениями, полученными с использованием уравнения 5.46. Для меньшего частицы, $d_p < 0,7 \text{ мкм}$, согласие было разумным, но для $d_p > 0,7 \text{ мкм}$, согласованное определение номинальный.

Для мелких частиц, V_a характеризуется его тепловой скоростью, а средняя тепловая скорость удара определяется формулой:

$$V_a = \frac{[(48k_B T)]^{0.5}}{\pi^2 \rho d_{nn}^3} \quad (5.48)$$

где k_B является постоянной Больцмана и T является температурой (Ван и Каспер, 1991). Теоретическая модель, разработанная Вангом и Каспером, предполагает, что скорость теплового удара частицы превысит критическую скорость прилипания в диапазоне размеров от 1 до 10 нм, в зависимости от параметров упругости и поверхностной адгезии. Экспериментальное подтверждение этого эффекта

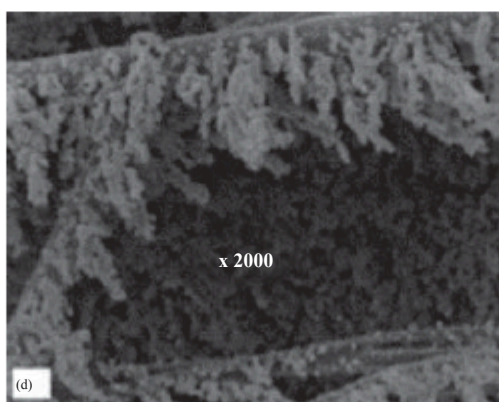
однако данных о тепловом отдаче при фильтрации недостаточно. Например, Ким, Харрингтон и Пуи (2007) измерили проникновение частиц размером 3-20 нм через широкий диапазон фильтрующих материалов и не обнаружили существенных признаков отскока. Neim *et al.* (2005) исследовали фильтрацию заряженных и незаряженных частиц в диапазоне 2,5 -20,0 нм на заземленных металлических волокнах и сетках, а также не обнаружили эффектов теплового отскока. Однако Ким *et al.* (2006) измерили эффективность фильтрации через стекловолоконные фильтры для наночастиц размером до 1 нм и обнаружили эффекты отскока для частиц размером менее 2 нм. Экспериментальное исследование было проведено при температурах до 500 К компанией Shin *et al.* (2008) для частиц в диапазоне 3-20 нм и не было обнаружено теплового отскока.

Недавно Муре *et al.* (2011) расширили теоретическую модель Ванга и Каспера и пришли к выводу, что эффекты теплового отскока должны наблюдаться только в субнанометровом диапазоне частиц.

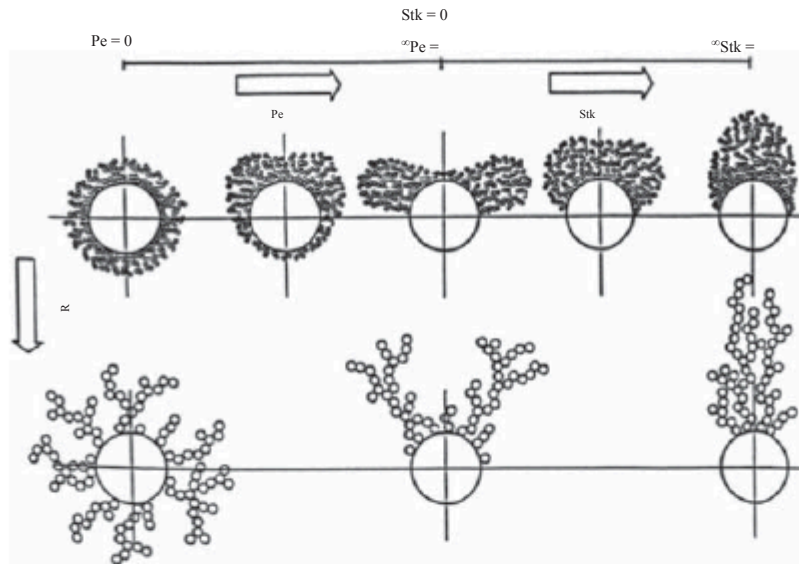
5.3.2 Загрузка частиц

По мере сбора частиц в фильтре они изменяют его структуру и влияют как на перепад давления, так и на эффективность сбора. Следовательно, важно понимание механизмов образования отложений и влияния на производительность фильтра. Однако это очень сложный процесс и он все еще является областью активных исследований.

Если взять волокно из загруженного фильтра и исследовать его, то будет видно, что на его поверхности образовались дендриты. Дендриты представляют собой, по существу, ветвистые структуры, состоящие из осажденных частиц (см. Рис. 5.4). Образование дендритов на волокне зависит от доминирующего механизма осаждения. В случае диффузионного осаждения дендриты образуются по всей поверхности волокна, и для перехвата они захватываются на передней поверхности волокна. В случае инерционного удара частицы будут в основном осаждаться вблизи передней точки застоя волокна. Электростатические силы, как правило, вызывают осаждение в любой точке на поверхности волокна, аналогичное диффузионному осаждению (Oh *et al.*, 2002). Электрические силы также способствуют разрушению дендритов, поскольку они имеют тенденцию притягивать как захваченные, так и переносимые по воздуху частицы. Внешние электрические поля заставляют частицы образовывать длинные дендриты с относительно небольшим количеством ответвлений (Браун, 1993). Рассматривая только механические механизмы осаждения, на рисунке 5.5 показано



Фотография образования дендритов. Воспроизведено с разрешения Thomas Рисунок 5.4 *et al.* (1999). Авторское право © 1999, Elsevier Ltd.



Схематическая взаимосвязь между структурой отложений и условиями фильтрации в терминах **Рисунок**

5.5 из параметров безразмерной фильтрации: число Пекле, Pe , число Стокса, St , и промежуточный номер рецепции, R . Воспроизведено по Kasper, Schollmeier and Meyer (2010) с разрешения Elsevier.

взаимосвязь между структурой отложений и рабочими условиями фильтрации. Как видно на рисунке, для небольших Pe при малых значениях R , когда доминирующим механизмом является диффузионное осаждение, частицы будут равномерно распределены по волокну с относительно открытой пористой структурой..... Поскольку перехват становится все более важным, базовое распределение депозита останется прежним, но структура будет более открытой. Для больших волокон, когда инерционное воздействие является доминирующим, осаждение будет происходить исключительно на передней части волокна, причем большая часть будет близка к точке застоя. Как заявили Каспер, Шоллмайер и Мейер (2010), эта цифра ST не отражает всей реальности, особенно когда отскок частиц значителен.

Численное моделирование образования дендритов на волокнах проводилось в течение многих лет; обзор большей части этой работы см. в Brown (1993). Такое моделирование относится к ранним стадиям осаждения для различных механизмов и является очень дорогостоящим с точки зрения вычислений. Более поздняя работа в этой области была проделана Ли и Маршаллом (2007), которые включили эффекты отскока для частиц в режиме инерционного соударения. Было обнаружено, что безразмерный параметр адгезии оказывает доминирующее влияние на прогнозируемую скорость осаждения частиц. Подход решетки-Больцмана был принят Пшекопом, Москалем и Градоном (2003) для описания структуры отложений на цилиндрическом коллекторе частиц в диффузионном режиме. Одной из причин, по которой изучение загрузки частиц требует больших вычислительных затрат, является необходимость пересчета поля течения при осаждении; Карадимос и Окон (2003) исследовали это и обнаружили, что эффективность однослойного волокна завышена, когда пересчет не выполняется. CFD-моделирование, проведенное Леманном и Каспером (2002), демонстрирует важность отскока частиц от структуры отложений в инерционном режиме и показывает, что моделирование должно быть трехмерным, чтобы быть точным. Леманн и Каспер (2002) также использовали моделирование для определения плотности упаковки образовавшихся отложений.

Осаждение частиц на электретоном волокне было смоделировано Канаокой, Хираги и Тантапаничакуном (2001). Несмотря на растущую мощность компьютеров., численные модели нагружения частицами все еще ограничены в том, чего они могут достичь.

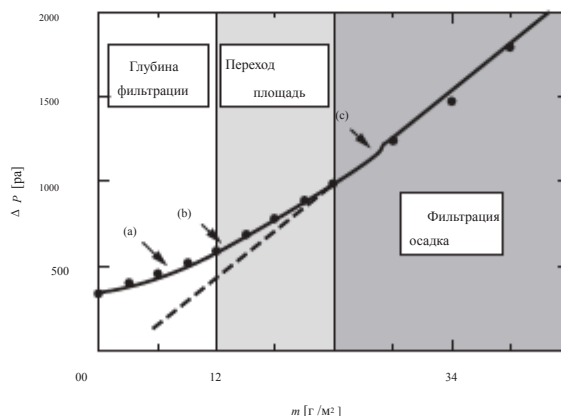
Экспериментальная работа по изучению характеристик загруженных фильтров показала, что увеличение перепада давления на фильтре по мере увеличения нагрузки можно описать двумя основными этапами: во время первого этапа изменение происходит медленно, но на втором этапе увеличение становится заметно быстрым и линейным (Thomas *et al.*, 1999), как показано на рисунке 5.6. *et al.* (1999) разработали модель для описания работы фильтра во время загрузки, которая, как было установлено, хорошо согласуется с экспериментальными данными (Thomas *et al.*, 2001). В экспериментальном исследовании, проведенном Сонгом, Паком и Ли (2006), было получено эмпирическое выражение для перепада давления в зависимости от диаметра частицы и поправочного коэффициента Каннингема. Используя экспериментальные результаты Уолша и Стенхауса (1997) по характеристикам электретоного фильтра в условиях запыленности заряженными и незаряженными частицами (Салим, Тантапаничакун и Канаока, 2006), а

было получено полуэмпирическое выражение для вкладов η как сумма электрического и механического

Недавно была проведена детальная экспериментальная работа для получения более глубокого понимания характеристик отдельных волокон (Kasper *et al.*, 2009; Каспер, Шолльмайер и Мейер, 2010). Было обнаружено, что эффективность одного волокна описывается степенным законом типа:

$$\frac{\eta(M)}{\eta(0)} = 1 + bM^c \quad (5.49)$$

где b и c являются эмпирическими коэффициентами соответствия и M представляет собой накопленную массу на единицу объема фильтра. Экспериментальный процесс, проведенный группой Каспера, позволил получить много полезной структурной информации об осадке, включая качественную информацию о морфологии осадка в зависимости от размера частиц, скорости потока и диаметра волокон для частиц, для которых важны инерция, перехват и отскок. Было обнаружено, что переход от компактных отложений к более дендритным структурам, показанным на рис. 5.5, обусловлен не перехватом, а отскоком частиц.



Изменение перепада давления, P , при массовой нагрузке, m . Воспроизведено с разрешения автора Рисунок 5.6 по материалам Thomas *et al.* (1999). Авторское право © 1999, Elsevier Ltd.

5.4 Фильтровать Случайность

Практически все приведенные здесь теоретические результаты были получены для отдельного волокна или правильного набора волокон, расположенных перпендикулярно потоку газа. Реалистичный волокнистый фильтр, такой, как на рисунке 5.1, показывает случайный набор волокон, расположенных не совсем под прямым углом к потоку. Было относительно мало исследований влияния этой случайности, но новаторское исследование Швейерса и Леффлера (1994) показало, что важно учитывать это при расчете эффективности фильтра. Их численная модель рассматривала передачу через случайный массив ячеек, содержащих волокна, заданные случайной геометрией (углом к потоку) и долей локальной упаковки. Проблема также была решена с помощью прямой статистической модели, учитывающей эффективность передачи через ряд ячеек со случайными величинами (Клемент и Даннетт, 2000), которая показывает, что случайность всегда снижает общую эффективность фильтрации по сравнению с той, которая получена из средних значений переменных, которые определяют ячейки. Для дальнейшего проведения этого исследования необходимо получить гораздо больше экспериментальной информации о случайности фильтров, например, для распределений плотности упаковки, исследованных Леманном, Харди и Каспером (2003).

5.5 Области применения

Волокнистые фильтры являются эффективными устройствами для улавливания частиц и, следовательно, имеют множество применений. В этом разделе рассматриваются лишь некоторые из них, и будут предоставлены ссылки, в которых содержится более подробная информация.

Люди подвергаются воздействию вредных частиц на рабочем месте и дома. Для снижения воздействия был разработан широкий спектр систем управления, от небольших персональных устройств до крупномасштабных промышленных установок. Небольшие респираторные фильтры обычно используются для защиты людей от вредных биологических и небактериальных аэрозолей. Работа по защите респираторов от небактериальных частиц проводилась Уэйком и Брауном (1988), Ортизом, Содерхольмом и Вальдесом (1988), Брауном, Уэйком и Греем (1988) и Эшбо *et al.* (2009). Недавнее увеличение производства инженерных наночастиц в рабочей среде привело к проведению исследований эффективности респираторов для борьбы с этими мелкими частицами, многие из которых рассмотрены в Mostofi *et al.* (2010). Другой областью, приобретающей все большее значение, является фильтрация биоаэрозолей: частиц биологического происхождения, включая вирусы, бактерии, грибы и пыльцу. Интерес к этой области возрос после вспышки тяжелого острого респираторного синдрома (ТОРС) в 2003 году и глобальной вирусной инфекции H1N1 в 2009 году, а также в связи с растущей угрозой биотерроризма. Обзор некоторых работ по характеристикам респираторов при фильтрации биоаэрозолей можно найти в Rengasamy, Zhuang and BettyAnn (2004) и Xu *et al.* (2011).

Людям, страдающим аллергическими респираторными заболеваниями, часто рекомендуется фильтровать воздух как часть комплекса мер, направленных на снижение воздействия аллергенов внутри помещений. В таких ситуациях фильтрация воздуха может быть обеспечена фильтрацией всего дома с помощью домашней системы отопления, вентиляции или кондиционирования воздуха, переносных комнатных воздухоочистителей или с помощью комбинации этих методов. Обзор исследований по различным типам фильтрации приведен в работе Саблетта (2011).

Высокоэффективные фильтры типа твердых частиц (HEPA), которые удаляют находящиеся в воздухе частицы размером 0,3 мкм и выше с эффективностью 99,97%, используются во многих больницах (таких как

операционные залы) для снижения уровня инфицирования (Дхаран и Питтет, 2002). Поскольку фильтрация HEPA является относительно недорогой и исследования показали, что она может значительно снизить уровень переносимых по воздуху микроорганизмов и / или частоту инфицирования некоторыми воздушно-капельными патогенами, Кертис (2008) утверждает, что ее, вероятно, следует использовать во всех больничных палатах. Также было обнаружено, что использование портативных HEPA-фильтров значительно снижает уровень некоторых вирусов, переносимых воздушно-капельным путем (Curtis, 2008).

Выхлопные газы дизельных двигателей являются основным источником образования ультрадисперсных частиц в местах с высокой интенсивностью движения. Исследования показывают, что пассажиры, путешествующие в своих транспортных средствах, могут подвергаться высокому воздействию ультрадисперсных частиц (Чжу *et al.*, 2007). Чтобы уменьшить это воздействие, многие автомобили в настоящее время оснащены салонными воздушными фильтрами. Некоторые работы по эффективности этих фильтров приведены в Rudell *et al.* (1999) и Qi *et al.* (2008). Другим все более популярным видом транспорта, который сопряжен с риском воздействия на пассажиров твердых частиц, являются авиAPERелеты. Замкнутое пространство, ограниченная вентиляция, длительное воздействие и рециркуляция воздуха являются факторами риска передачи инфекций дыхательных путей. Использование рециркулируемого воздуха означает, что требуется фильтрация (Ледер и Ньюман, 2005). В большинстве крупных современных коммерческих самолетов используются фильтры HEPA, которые, как было установлено, эффективны для удаления находящихся в воздухе загрязнений из рециркулируемого воздуха в таких транспортных средствах (Bull, 2008).

5.6 Выводы

В данной работе была предпринята попытка обобщить основные факторы, влияющие на эффективность волокнистых фильтров, и обсудить их применение. Были упомянуты основные важные выводы, сделанные в ходе прошлых исследований. Хотя фильтры и процесс фильтрации изучались в течение многих лет, особенно с 1960-х годов и с развитием компьютерных систем и экспериментальных установок (Sprunty, 1997), это все еще активная область исследований. Например, нынешний интерес к нанотехнологиям, несмотря на большие технологические перспективы, также несет в себе потенциальный риск для здоровья и поднимает вопрос о том, насколько эффективны фильтры для защиты людей. Необходимость защиты от глобальных угроз, таких как эпидемия гриппа или биотерроризм, требует дальнейшего понимания фильтрации микроорганизмов. В дополнение к новым направлениям исследований, открывающимся в результате изменения потребностей человека, все еще существуют фундаментальные области эффективности фильтрации, которые до конца не изучены. Например, хотя существуют формулы, подтвержденные экспериментальной работой, которые хорошо описывают характеристики чистого фильтра, наше понимание характеристик фильтров, содержащих отложения, менее полное и все еще требует дальнейших исследований.

В заключение, хотя мы значительно продвинулись в нашем понимании волокнистых фильтров, все еще остается много вопросов, на которые необходимо ответить, прежде чем это понимание будет полным.

Номенклатура

C	Поправочный коэффициент Каннингема
D	Коэффициент диффузии
ρ	Диэлектрическая проницаемость
ρ^D	волокнистого материала Диэлектрическая проницаемость
ρ^d	материала частиц Диаметр
ρ^d	фильтрующего волокна Диаметр частиц

$\mathcal{E}$	Электрическое поле
$\mathcal{E}$	Эффективность сбора
Φp	коэффициент восстановления
χ	Число Фруда
K_n	Вероятность сцепления или эффективность
K_u	число Кнудсена
κ	Коэффициент Кувабары ($= -0,5 \ln()$) - α α α^2)
M	0.75 + - 0.25 Постоянная Больцмана
m	Масса осажденного материала на единицу объема
N	фильтрующего материала Масса частиц
N_a	Гравитационный параметр
$N_{\text{вышит}}$	Количество частиц, попадающих в фильтр
N_{Qq}	Количество частиц, покидающих фильтр Безразмерный параметр, описывающий захват заряженных частиц.
	частицы заряженным волокном
N_{Q0}	Безразмерный параметр, описывающий захват нейтральных частиц
	заряженным волокном
N_{eq}	Безразмерный параметр, описывающий захват заряженных
	частиц линейным дипольно заряженным волокном
N_{e0}	Безразмерный параметр, описывающий захват нейтральной
	частицы линейным дипольно заряженным волокном
N_{pq}	Безразмерный параметр, описывающий захват заряженных
	частицы с помощью поляризованного волокна
N_{p0}	Безразмерный параметр, описывающий захват нейтральных частиц
	поляризованным волокном
N_{q}	Безразмерный параметр, описывающий захват заряженных
	частицы из нейтрального волокна
N	Безразмерная концентрация частиц,
P	Проникающее
Pe	давление жидкости,
	число Пекле,
q	Заряд, удерживаемый частицей,
Q	Заряд на единицу длины волокна
R	
Re	Параметр перехвата, отношение диаметров частиц и
	волокон Число Рейнольдса потока
r	Полярная координата
s	
	Параметр механизма осаждения ($= R/$ δ
St	) Число Стокса Модифицированное
${}_m C m$	число Стокса ($= St/(2Ku)$)
T	Температура
${}_0 U$	Скорость свободного потока

U	Скорость жидкости
U_p	Скорость частиц
dV	Скорость дрейфа частиц
v	Скорость удара частиц
V_s	Скорость оседания частиц
x, y	Декартовы компоненты
α	Фракция заполнения фильтра
δ	Безразмерная толщина диффузионного слоя
ϵ	Диэлектрическая проницаемость свободного пространства
Φ	Энергия адгезии Эффективность
γ	Эффективность по одному волокну Эффективность
η	по одному волокну за счет диффузионного осаждения Эффективность
η_D	по одному волокну за счет гравитационного
η_G	осаждения эффективность по одному волокну
η_I	за счет инерционного осаждения эффективность
η_R	по одному волокну за счет перехвата Общее выражение
η_{EL}	для эффективности по одному волокну за счет электростатического осаждения
η_{Re}	Общее выражение для эффективности использования одного волокна, принимая во внимание отскок частиц
η_{C-QQ}	Одиночно-волоконно эффективности заряженных волокон с заряженными частиц
η_{DQ}	Одиночно-волоконно эффективности путем заряженные волокна с нейтральным частиц
η_{eq}	Эффективность одного волокна за счет линейного дипольного волокна с заряженным частицы
η_{eq}	Эффективность одного волокна за счет линейного дипольного волокна с нейтральным частицы
η_{pq}	Одиночно-волоконно эффективность поляризованного волокна с заряженными частиц
η_{pQ}	Одиночно-волоконно эффективность поляризованного волокна с нейтральным частиц
η_{Qq}	Одиночно-волоконно эффективности за счет нейтрального волокна с заряженными частиц
λ	Длина свободного пробега
μ	молекул жидкости Вязкость
θ	жидкости Полярная координата
ρ	Плотность жидкости
ρ^p	Плотность частиц Плотность
σ	поверхностного заряда
ψ	волокна Функция потока

Список литературы

- Асгарян Б. и Ченг Ю.С. (2002) Фильтрация волокнистого аэрозоля. *Наука об аэрозолях и технология*, **36**, 10 -17.
- Боскович Л., Аграновски И.Е., Альтман И.С. и Брэддок Р. Д. (2008) Эффективность фильтра как функция скорости и формы наночастиц. *Журнал аэрозольной науки*, **39**, 635-644.
- Браун, Р. К. (1993) *Фильтрация воздуха. Комплексный подход к теории и применению Волокнистых фильтров*, Pergamon Press, Оксфорд.
- Браун, Р. К., Уэйк, Д., Грей, Р. *et al.* (1988) Влияние промышленных аэрозолей на характеристики электрически заряженного фильтрующего материала. *Анналы гигиены труда*, **32**, 271-294.
- Булл К. (2008) Фильтрация воздуха в салоне: помогает защитить пассажиров от инфекционных заболеваний. *Медицина для путешествий и инфекционные заболевания*, **6**, 142 - 144.
- ЦАО Ю. Н., Чунг, С. С. Ян, З. Д. (2004) численное исследование электретов фильтра ком-представляет из массива попарно-параллельного прямоугольного сплит-типа волокон. *Наука об аэрозолях и технология*, **38**, 603 - 618.
- Черняков А.Л., Кириш А.А. и Кириш В.А. (2011) Эффективность инерционного осаждения аэрозольных частиц в волокнистых фильтрах с учетом отскока частиц от волокон. *Коллоидный Журнал*, **73** (3), 389-393.
- Чунг, К.С., Цао, Ю.Х. и Ян, З.Д. (2005) Численная модель осаждения частиц и загрузка в электретный фильтр с прямоугольными разъемными волокнами. *Вычислительная механика*, **35**, 449-458.
- Клемент, К.Ф. и Даннетт, С.Дж. (2000) Использование случайных величин в волокнистой фильтрации теория, Европейская аэрозольная конференция 2000 года. *Научный журнал по аэрозолям*, **31**, С200-201.
- Кертис, Л. Т. (2008) по профилактике внутрибольничных инфекций: обзор номера-фармакологические вмешательства. *Журнал госпитальной инфекции*, **69**, 204-219.
- Дхаран, С. и Питтет, Д. (2002) Контроль окружающей среды в операционных. *Журнал Больничная инфекция*, **51**, 79 - 84.
- Даннетт, С.Дж. и Клемент, К.Ф. (2009) Численная модель волокнистых фильтров, содержащих Пополнить. *Инженерный анализ с граничными элементами*, **33**(5), 601- 610.
- Эшбо, Дж.П., Гарднер, П.Д., Ричардсон, А.В. и Хофакр, К.С. (2009) N95 и P100 эффективность фильтра респиратора при высоком постоянном и циклическом расходе. *Журнал гигиены труда и окружающей среды*, **6**(1), 52-61.
- Филиппова О. и Ханель Д. (1997) Решеточно-больцмановское моделирование течения газовых частиц в Фильтры. *Компьютеры и жидкости*, **26**(7), 697 -712.
- Fuchs, N.A. (1964) *Механика аэрозолей*, Издание в Дувре, Нью-Йорк.
- Хаппель, Дж. (1959) Вязкое течение относительно массивов цилиндров. *Журнал Айше*, **5**(2), 174- 177.
- Хейм М., Маллинс Б.Дж., Уайлд М. *et al.* (2005) Эффективность фильтрации аэрозольных частиц ниже 20 нанометров. *Наука и технология в области аэрозолей*, **39**, 782 - 789.
- Хеллу, М., Мартинес, Дж. и Эль Язиди, М. (2004) Стоксово течение через микроструктурные модель волокнистой среды. *Коммуникации в области исследований механики*, **31**, 97- 103.
- Хиндс, У.К. (1999) *Аэрозольная технология: свойства, поведение и измерение содержания частиц, переносимых воздухом-частицы несут*, John Wiley & Sons, Inc., Нью-Йорк.
- Хоссейни, С.А. и Тафреши, Х.В. (2010) Моделирование фильтрации частиц в неупорядоченных двумерных областях сравнение с клеточными моделями. *Технология разделения и очистки*, **74**, 160- 169.

- Хуан, Б., Яо, К., Ли, С.К. *et al.* (2006) Экспериментальное исследование захвата частиц по одному волокну с использованием метода микроскопического изображения. *Порошковая технология*, **163**, 125 - 133.
- Джаганатан С., Тафреши Х.В. и Пурдейхими Б. (2008) Реалистичный подход к моделированию повышения проницаемости волокнистых сред: трехмерная визуализация в сочетании с CFD-моделированием. *Химическая инженерия и технологии*, **63**, 244-252.
- Япунтич, Д.А., Франклин, Л.М., Пуи, Д.Ю. *et al.* (2007) Сравнение двух наноразмерных тесты фильтрации воздуха частицами в диапазоне диаметров от 10 до 400 нанометров. *Журнал Исследования наночастиц*, **9**, 93- 107.
- Канаока, С., Эми, Х., Хираги, С. и Миодзе, Т. (1986) Морфология отдельных- поздние агломерации на цилиндрическом волокне и эффективность сбора заряженного волокна. Конференция, Берлин, 1986, - Материалы 2-й Международной аэрозольной конференции Pergamon Journals Ltd, Оксфорд, стр. 674-677. Канаока С., Эми Х., Отани Ю. и Иияма Т. (1987) Влияние заряженного состояния частиц об электретной фильтрации. *Наука и технология аэрозолей*, **7**(1), 1 - 13.
- Канаока С., Хираги С. и Тантапаничакун В. (2001) Стохастическое моделирование процесса агломеративного осаждения аэрозольных частиц на электретное волокно. *Технология производства порошков*, **118**, 97- 106.
- Карадимос А. и Окон Р. (2003) Влияние пересчета поля течения на волокнистые нагрузка фильтра: численное моделирование. *Порошковая технология*, **137**, 109- 119.
- Каспер Г., Шоллмейер С. и Мейер Дж. (2010) Структура и плотность сформированных отложений на волокнах фильтра путем инерционного осаждения частиц и их отскока. *Научный журнал по аэрозолям*, **41**, 1167 -1182.
- Каспер Г., Шоллмайер С., Мейер Дж. и Хоферер Дж. (2009) Эффективность сбора одиночное фильтрующее волокно, загруженное частицами. *Научный журнал по аэрозолям*, **40**, 993 - 1009.
- Ким К.С., Бао Л., Окуяма К. *et al.* (2006) Эффективность фильтрации волокнистого фильтра для наночастицы. *Журнал исследований наночастиц*, **8**, 215 - 221.
- Ким С.К., Харрингтон М.С. и Пуи Д.Ю.Х. (2007) Экспериментальное исследование наночастиц- проникновение cles через коммерческие фильтрующие материалы. *Журнал исследований наночастиц*, **9**, 117-1125.
- Ким Дж.К., Отани Ю., Ното Д. *et al.* (2005) Первоначальные характеристики сбора полимерной ваты фильтры и оценка плотности заряда. *Наука и технология в области аэрозолей*, **39**, 501-508.
- Кириш А.А. и Фуке Н.А. (1967) Течение жидкости в системе параллельных цилиндров, перпендикулярных направлению потока при малом числе Рейнольдса. *Журнал Физического общества Японии*, **22**(5), 1251 - 1255. Кириш, В.А. (2005) Диффузионное осаждение тяжелых субмикронных аэрозольных частиц на волокнистых Фильтры. *Коллоидный журнал*, **67**(3), 313- 317.
- Кириш, В.А. (2006) Стоксово течение в периодических системах параллельных цилиндров с пористыми оболочками.- гибкий журнал. *Colloid Journal*, **68**(2), 173- 181.
- Кириш, В.А. (2007) Осаждение аэрозольных наночастиц в фильтрах, состоящих из волокон с пористыми оболочками. *Colloid Journal*, **69**(5), 655 -660.
- Кириш, В.А. (2011) Диффузионное осаждение наночастиц в 3D-модели волоконного фильтра. *Русский Журнал физической химии А*, **85**(11), 2089 -2093.
- Клоуда, Г.А., Флетчер, Р.А., Гиллен, Дж.Г. и Веркоутерен, Р. (2011) Коллекция аэрозолей эффективность сортового фильтра из металлического волокна при высокой скорости воздушного потока (10 м/с). *Наука об аэрозолях и технология*, **45**(3), 336- 342.

- Кувабара, С. (1959) Силы, испытываемые случайно распределенными параллельными кругами цилиндры или сферы в вязком потоке при малых числах Рейнольдса. *Журнал Физического общества Японии*, **14**(4), 527-532. Квон С.Б., Ким Х.Т. и Ли К.В. (2002) Аналитические решения для диффузионного осаждения-использование полидисперсных аэрозолей в волокнистых фильтрах. *Наука и технология в области аэрозолей*, **36**(6), 742 - 747.
- Ледер, К. Ньюман, Д. (2005) респираторных инфекций во время авиаперелетов. *Внутренний Журнал Медицина*, **35**, 50- 55.
- Ли, К. В. и Лю, Б.Я.Х. (1982) Теоретическое исследование фильтрации аэрозоля волокнистыми фильтрами. *Наука и технология аэрозоля*, **1**, 147 -161.
- Леманн, М.Дж., Харди, Э.Х. и Каспер, Г. (2003) Локальное распределение плотности упаковки внутри волокнистого фильтра - определение методом МРТ. *Тезисы Европейской аэрозольной конференции*, 513- 514. Леманн, М.Дж. и Каспер, Г. (2002) CFD-моделирование загрузки одного волокна, в (ред. М.Дж. Леманн и Г. Каспер), *Загрузка частиц и кинетика фильтрации в волокнистых фильтрах*, стр. 91-98, Механический институт и механический университет Карлсруэ, ISBN: 3-9805-220-2-4. Ли, С.К. и Маршалл, Дж.С. (2007) Моделирование осаждения микрочастиц дискретными элементами. на цилиндрическом волокне в массиве. *Научный журнал по аэрозолям*, **38**, 1031 - 1046.
- Лю, Г.З. и Ван, П.К. (1997) Падение давления и эффективность перехвата многоволока Фильтры. *Наука и технология в области аэрозолей*, **26**(4), 313 - 325.
- Лабиринт, Б., Tafreshi, X. В. Ван, В. и Pourdeyhi, Б. (2007) моделирование нестационарного-государство фильтрации через нановолокон средств массовой информации по сниженным рабочим давлением. *Научный журнал по аэрозолям*, **38**, 550 -571.
- Мостофи Р., Ван Б., Хагигат Ф. *et al.* (2010) Эффективность механических фильтров и респираторов для улавливания наночастиц - ограничения и направления на будущее. *Промышленное здравоохранение*, **48**, 296-304.
- Муре Г., Шазеле С., Томас Д. и Бернер Д. (2011) Обсуждение термического отскока наночастиц. *Технология разделения и очистки*, **78**, 125-131.
- Нгуен Х. и Бикманс Дж.М. (1975) Эффективность улавливания аэрозольных раг одиночными волокнами- ticles в реальных и модельных фильтрах в области инерциального перехвата. *Журнал аэрозольной науки*, **6**, 205-212. О, Ю.В., Чон, К.Дж., Юнг, А.И. и Юнг, Ю.В. (2002) Имитационное исследование коллекции субмикронных частиц в униполярно заряженном волокне. *Наука и технология в области аэрозолей*, **36**, 573 - 582.
- Ортис В. Л., Soderholm, с. и-Вальдес, О. Ф. (1988) проникновение респиратор фильтры к асбест аэрозоля. *Журнал Американской ассоциации промышленной гигиены*, **49**(9), 451-460.
- Пайет С., Буланд Д., Мадлен Г. и Рену А. (1992) Проникновение и давление падение НЕРА-фильтра при загрузке субмикронными частицами жидкости. *Научный журнал по аэрозолям*, **23** (7), 723-735.
- Подгорский, А. (2009) Оценка верхнего предела проникновения аэрозольных наночастиц через неоднородные волокнистые фильтры. *Журнал исследований наночастиц*, **11**, 197-207. Подгорский А. и Балази А. (2008) Новые формулы эффективности осаждения электрически нейтральных субмикронных аэрозольных частиц в волокнистых фильтрах с биполярным зарядом, полученные с использованием подхода броуновской динамики. *Наука и технология в области аэрозолей*, **42**(2), 123-133.

- Подгорски А., Майссер А. и Владислав С. В. (2011) Проникновение монодисперсных, однозарядных наночастиц через полидисперсные фильтры. *Наука и технология в области аэрозолей- нология*, **45**(2), 215-233. Пшекоп Р. и Градон Л. (2008) Осаждение и фильтрация наночастиц в композициях нано- и микроразмерных волокон.- положения. *Наука и технология в области аэрозолей*, **42**, 483- 493.
- Пшекоп Р., Москаль А. и Градон Л. (2003) Подход решетки-Больцмана для описания- исследование структуры осажденных твердых частиц в волокнистых фильтрах. *Журнал аэрозольной науки.*, **34**, 133- 147. Птак Т. и Ярошик Т. (1990) Теоретико-экспериментальная модель фильтрации аэрозоля для волокнистых фильтров с промежуточными числами Рейнольдса.
- Материалы 5-го Всемирного конгресса по фильтрации, Ницца. Qi, C., Stanley, N., Rui, D.Y.H. и Kuehn, T.H. (2008) Лабораторные и дорожные оценки воздушных фильтров салона с использованием датчиков количества и площади поверхности. *Защита окружающей среды Наука и технология*, **42**, 4128-4132.
- Цянь Ф., Чжан, J. и Хуанг, З. (2009) Влияние условий эксплуатации и геометрии параметра на фильтрующие характеристики волокнистого фильтра. *Химическая инженерия и технология*, **32**(5), 789 - 797. Рамарао Б.В., Тянь К. и Мохан С. (1994) Расчет эффективности одного волокна для перехват и столкновение с наложенным броуновским движением. *Научный журнал по аэрозолям. епсе*, **25**(2), 295-313. Рейнор, П.С. (2008) Эффективность перехвата одиночных волокон для эллиптических волокон. *Наука об аэрозолях и технология*, **42**(5), 347- 368.
- Рембор, Х.Дж., Маус, Р. и Умхауэр, Х. (1999) Измерения эффективности одиночного волокна при критических значениях числа Стокса. *Характеристика Частиц и систем частиц*, **16**, 54 -59.
- Rengasamy A., Чжуан, З. П. и ВегуАпп, М. С. (2004) защита органов дыхания против проблема: обзор литературы и задачи исследований. *Американский журнал контроля инфекций- контроль*, **32**(6), 345 - 354. Ромей, Ф.Дж., Лю, Б.Я.Х. и Чэ, С.Дж. (1998) Экспериментальное исследование электростатического колпачка- предохранительные механизмы в коммерческих электретенных фильтрах. *Наука и технология в области аэрозолей*, **28**(3), 224-234.
- Руделл Б., Вассе У., Херстедт П. *et al.* (1999) Эффективность автомобильных салонных воздушных фильтров снизить острое воздействие выхлопных газов дизельных двигателей на здоровье людей. *Медицина труда и экологическая медицина*, **56**, 222-231.
- Саз-лим, У., Тантапаничакун, У. и Канаока, С. (2006) Корреляция эффективности коэффициент усиления одиночного электретенного волокна. *Научный журнал по аэрозолям.*, **37**, 228 - 240. Швеерс Э. и Леффлер Ф. (1994) Реалистичное моделирование поведения волокнистых фильтров с учетом структуры фильтра. *Порошковая технология.*, **80**, 191 - 206.
- Шин В.Г., Малхолланд Г.В., Ким С.К. и Пуи Д.Ю.Х. (2008) Экспериментальное исследование эффективность фильтрации наночастиц размером менее 20 нм при повышенных температурах. *Журнал Aerosol Science*, **39**, 488-499.
- Сонг, К.Б., Парк, Х.С. и Ли, К.В. (2006) Экспериментальное исследование засорения фильтра монодисперсными частицами PSL. *Порошковая технология.*, **163**, 152-159.
- Сперни, К. Р. (1997) *Достижения в области аэрозольной фильтрации*, Издательство Льюиса, Лондон.

- Стечкина И.Б. и Фукс Н.А. (1966) Исследования волокнистых аэрозольных фильтров - I. Расчет диффузионного осаждения аэрозолей в волокнистых фильтрах. *Анналы гигиены труда.*, 9, 59-64. Саблетт, Дж.Л. (2011) Эффективность воздушных фильтров и воздухоочистителей при аллергических респираторных заболеваниях обзор последней литературы. *Текущие отчеты об аллергии и астме*, 11, 395- 402. Томас Д., Конталь П., Реноден В. *et al.* (1999) Моделирование перепада давления в HEPA-фильтрах во время динамической фильтрации. *Научный журнал по аэрозолям.*, 30, 235-246.
- Томас, Д., Пенникот, П., Контал, П. *et al.* (2001) Засорение волокнистых фильтров твердыми частицами экспериментальное и модельное исследование аэрозольных частиц. *Химическая инженерия.*, 56, 3549 - 3561. Торп, А. и Браун, Р. К. (2003) Характеристики волокнистых волокон с электрическим усилением-измеренные с помощью монодисперсных аэрозолей. 231- 245. *Наука и технология в области аэрозолей*, 37(3),
- Тянь, К.В. и Рамарао, Б.В. (2007) *Гранулированная фильтрация аэрозолей и гидрозолей*, Elsevier, New York.
- Уэйк Д. и Браун Р. К. (1988) Измерения эффективности фильтрации вредных веществ респираторы от пыли против вдыхаемых и не вдыхаемых аэрозолей. *Анналы профессиональной гигиены.*, 32(3), 295-315. Уолш, Д.К. и Стенхаус, Дж.И.Т. (1997) Влияние размера частиц, заряда и состава о характеристиках нагружения электрически активного волокнистого фильтрующего материала. *Журнал Aerosol Science*, 28, 307-321.
- Ван, К.С. (2001) Электростатические силы в волокнистых фильтрах - обзор. *Порошковая технология.*, 118, 166- 170.
- Ван Дж., Чен Д.Р. и Пуи Д.Ю.Х. (2007) Моделирование эффективности фильтрации наночастиц-частицы в стандартных фильтрующих материалах. *Журнал исследований наночастиц.*, 109- 115. 9
- Ван, Х.К. и Каспер, Г. (1991) Эффективность фильтрации аэрозольных частиц нанометрового размера. *Научный журнал по аэрозолям*, 22(1), 31-41.
- Ван, К., Мейз, Б., Тафреши, Х.В. и Пурдейхими, Б. (2006) Тематическое исследование simu-обеспечение субмикронной фильтрации аэрозоля с помощью легких фильтрующих материалов с намоткой. *Химическая инженерная наука*, 61, 4871 - 4883.
- Ван Дж. и Пуи Д.Ю.Х. (2009) Фильтрация аэрозольных частиц эллиптическими волокнами: численное исследование.- *Журнал исследований наночастиц. Журнал исследований наночастиц*, 11, 185 - 196.
- Уильямс, М.М.Р. и Лоялка, С.К. (1991) Осаждение частиц и ресуспендирование. *Аэрозоль Наука: теория и практика*, Глава 7, Пергам, Оксфорд, стр. 326-374.
- Сюй, З., Ву, Ю., Шэнь, Ф. *et al.* (2011) Наука, технология и инжиниринг в области биоаэрозолей: прошлое, настоящее и будущее. *Наука и технология в области аэрозолей*, 45(11), 1337-1349.
- Ямада С., Такафуми С. и Есно О. (2011) Влияние неоднородности фильтра на воздух фильтрация наночастиц. *Исследование аэрозолей и качества воздуха*, 11, 155-160.
- Чжу, Ю., Эйгурен-Фернандес, А., Хинде, У.К. и Мигель, А.Х. (2007) Пассажир пригородного сообщения. воздействие ультрадисперсных частиц на автострадах Лос-Анджелеса. *Наука об окружающей среде и технологии*, 41, 2138-2145. Чжу К., Лин К.Х. и Чунг К.С. (2000) Волокнистая фильтрация с преобладанием инерционного воздействия с прямоугольными или цилиндрическими волокнами. *Порошковая технология*, 112, 149- 162.

Дистанционное зондирование атмосферных аэрозолей

Сагник Дей¹ и Саччида Нанд Трипати²

¹ Центр атмосферных наук, ИИТ Дели, Индия
² Департамент гражданского строительства, ИИТ Канпур, Индия

6.1 Введение

Атмосферные аэрозоли представляют собой жидкие или твердые частицы, взвешенные в атмосфере, радиусы которых варьируются от нескольких нанометров до десятков микрометров. Эти частицы могут быть непосредственно выброшены антропогенными (например, при сжигании ископаемого топлива) и природными (например, пыль, морской аэрозоль, вулканический пепел) источниками или могут образовываться из газов-прекурсоров (например, вторичный органический аэрозоль, сульфаты и т.д.). Интерес к изучению атмосферных аэрозолей можно отнести к 1920-м годам (Bray, 1929). С тех пор произошло значительное улучшение нашего понимания роли аэрозолей в качестве воздуха (Lelieveld *et al.*, 2002; Чоу и Уотсон, 2007) и энергетический бюджет земли (Хейвуд и Буше, 2000; Ю. *et al.*, 2006). Географически локализованные источники/ поглотители и трансформации в течение их короткого срока службы (например, смешивание различных видов аэрозолей, гигроскопический рост частиц) приводят к чрезвычайной пространственной и временной неоднородности оптических и микрофизических свойств аэрозолей.

Аэрозоли влияют на радиационный баланс земли посредством трех различных механизмов: во-первых, они непосредственно рассеивают и поглощают солнечную и земную радиацию (Чарльсон и Пилат, 1969; Charlson *et al.*, 1992; Чилек и Вонг, 1995; Хейвуд и Буше, 2000; Раманатан *et al.*, 2001; Буше и Фам, 2002; Беллуэн *et al.*, 2005); во-вторых, они действуют как ядра конденсации облаков (CCN) и тем самым влияют на альбедо облаков и время их существования (Twomey, 1977; Альбрехт, 1989; Ломанн и Фейхтер, 2005; Андреае и Розенфельд, 2008); и в-третьих, прямое поглощение ими солнечного излучения может изменять тепловую структуру атмосферы

и, следовательно, образование облаков (Хансен, Сато и Руди, 1997; Аккерман *et al.*, 2000; Корень *et al.*, 2004, 2008; Джонсон, Шайн и Форстер, 2004). Возмущение чистого (нисходящего минус восходящего) излучения аэрозолями через все три механизма количественно определяется с помощью аэрозольного радиационного воздействия. Средняя аэрозоля прямые и косвенные (только альбедо облаков эффект) радиационных заставляя практически наверняка будет отрицательный, при средней стоимости -1.3 ж м^{-2} от $-2,2$ до $-0,5 \text{ Вт м}^{-2}$

, соответственно, в доверительном диапазоне 90% (IPCC, 2007). Однако, большая неопределенность продолжает существовать в количественной оценке радиационного Форсинга аэрозоля из-за плохого представления аэрозолей в климатических моделях, из-за недостаточного сведения о аэрозоля спец- трал оптические свойства на больших пространственно-временных масштабов и сложного взаимодействия аэрозолей, облаков и метеорологии (Стивенс и feingold, 2009).

Концентрация аэрозоля в атмосферном столбе количественно определяется с помощью оптической глубины аэрозоля (AOD), которая является мерой столбчатого поглощения (рассеяния и адсорбции) солнечного излучения аэрозолями. Точные измерения AOD, альбедо однократного рассеяния (SSA) (мера рассеяния и поглощения частиц) и фазовой функции (мера углового распределения рассеянного излучения) требуются в глобальном масштабе для уменьшения неопределенности в отношении радиационного воздействия аэрозоля. Достижения в области методов дистанционного зондирования за последние 3 десятилетия позволили получить столь необходимые данные от местного до глобального масштаба, которые широко использовались учеными, политиками и широкой общественностью. На протяжении многих лет, применение аэрозолей в дистанционном зондировании развивалось с течением времени. Как более непосредственное *in situ* наблюдения стали доступны для оценки результатов поиска на основе дистанционного зондирования, алгоритмы были изменены, чтобы уменьшить ошибку поиска. Датчики, которые первоначально были выпущены для других целей, также использовались для получения информации о свойствах аэрозоля. Для решения нерешенных проблем аэрозольного дистанционного зондирования были предложены новые методы (например, поляриметрические измерения, многоугольная съемка). Цель этой главы - дать всесторонний обзор этих новейших методов поиска, их применимости для климатических исследований и будущих требований в этой области.

6.2 Наземное дистанционное зондирование

Наиболее точную информацию о характеристиках аэрозоля можно получить с помощью наземного дистанционного зондирования, поскольку оно не связано с проблемами отражения поверхности. За последние два десятилетия такие методы расширились, предоставляя ценные данные для валидации спутниковых продуктов и моделей.

6.2.1 Пассивное дистанционное зондирование

Существует ряд международных и национальных сетей, которые поддерживают наземный мониторинг свойств аэрозолей с использованием методов пассивного дистанционного зондирования. AOD может быть определен с земли с помощью радиометров, которые измеряют прямое спектральное пропускание солнечной радиации через атмосферу. Интенсивность солнечного излучения J на любой заданной длине волны может быть выражен как $J = J_0 e^{-\tau}$, где J_0 является ли солнечное излучение в верхней части атмосферы-сфера, m - масса воздуха, и τ - общая оптическая глубина. τ может состоять из рассеяния молекулами газа (широко известное как рэлеевское рассеяние), поглощения аэрозолями,

и

4

и поглощение остаточными газами. Вклад компонентов, отличных от аэрозолей, может быть точно оцененные и вычитающие их из τ дают AOD.

Наиболее популярной и широко распространенной наземной сетью дистанционного зондирования аэрозолей является Аэрозольная роботизированная сеть (AERONET), которая обслуживает хорошо откалиброванные солнечные фотометры и радиометры небесного свечения (Holben *et al.*, 1998, 2001). Радиометры измеряют прямое солнечное излучение в восьми спектральных диапазонах (от 340 до 1020 нм) в течение 10 секунд. Последовательность из трех таких измерений проводится с интервалом в 15 минут, чтобы свести к минимуму влияние облаков на измеряемую яркость. Измерения яркости неба в альмукантере и главной плоскости выполняются на длинах волн 440, 670, 870 и 1020 нм для получения большого диапазона углов рассеяния для восстановления распределения по размерам, фазовой функции и SSA (Дубовик и Кинг, 2000). AOD, извлекаемый из AERONET, имеет высокую

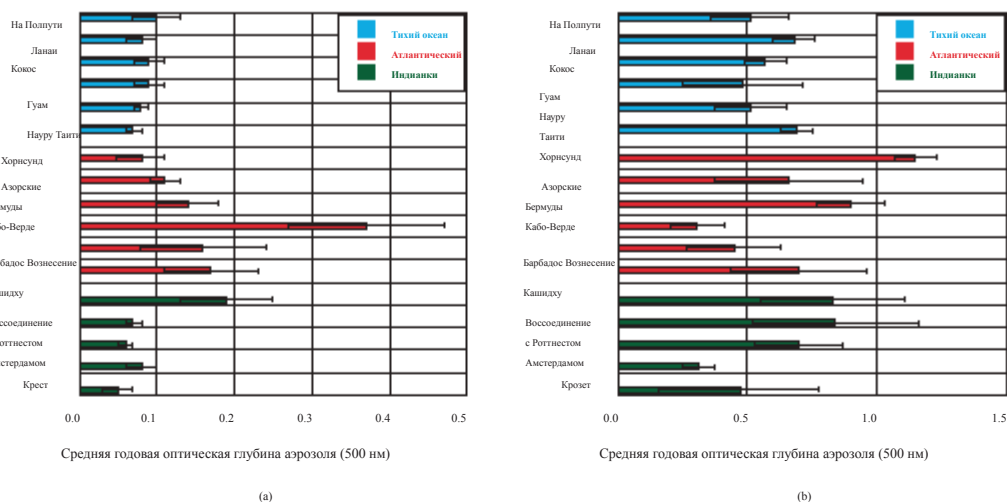
точный, с погрешностью $< \pm 0,01$ для длин волн более 440 нм и $\pm 0,02$ для более коротких длин волн. Оптические свойства аэрозоля восстанавливаются с большей точностью для

$AOD_{440} \geq 0,5$ с зенитным углом солнца $> 50^\circ$ (Дубовик *et al.*, 2000).

Данные AERONET использовались многочисленными исследователями для изучения характеристик и состава аэрозолей в нескольких регионах мира.

6.2.1.1 Оптические Свойства аэрозоля

Основные типы аэрозолей характеризуются своими микрофизическими (размер и форма частиц) и оптическими (способность рассеивать и / или поглощать излучение) свойствами. Например, как городские / промышленные, так и аэрозоли, сжигающие биомассу, имеют небольшие размеры и сферическую форму, но аэрозоли из биомассы имеют гораздо более низкий SSA (т. е. большее поглощение), чем городские/ промышленные аэрозоли. Природные аэрозоли (например, пылевые и морские) имеют большой размер, но пылевые частицы имеют более низкий SSA, чем морские частицы, и они имеют несферическую форму. Таким образом, если эти свойства могут быть измерены методами дистанционного зондирования, можно идентифицировать доминирующие типы аэрозолей. Однако следует отметить, что различные отдельные частицы часто смешиваются друг с другом, изменяя оптические свойства композитных аэрозолей. Дубовик обобщил оптические свойства ключевых типов аэрозолей *et al.* (2002), используя измерения AERONET. Эти результаты демонстрируют диапазон изменчивости оптических свойств аэрозоля в разных географических регионах, характеризующихся различными антропогенными и природными источниками. Как сжигаемые биомассой, так и городские аэрозоли характеризуются преобладанием частиц в режиме накопления и спектрально снижающимся SSA. Аэрозоли пустынной пыли характеризуются преобладанием частиц крупного размера и спектрально увеличивающимся SSA. Однако поглощение частицами пыли варьируется в зависимости от содержания гематита (Ковен и Фунг, 2006; Мишра и Трипати, 2008) и смешивания с другими видами (например, Дей, Трипати и Мишра, 2008; Мишра преимущественно крупнодисперсные). С другой стороны, морские аэрозоли являются частицы и рассеяние в природе. Океаны являются естественными испытательными полигонами для количественной оценки сезонных изменений региональных свойств аэрозолей, обусловленных сезонным переносом аэрозолей с континентов. Необходимость создания надежной климатологии морских частиц привела к разработке Морской аэрозольной сети под эгидой AERONET (Смирнов *et al.*, 2009). Усредненный по всему миру морской AOD при длине волны 500 нм и показатель Ангстрема (АЕ для диапазона длин волн 440-870 нм), полученные на основе измерений AERONET на острове, составляют 0,11 и 0,6 соответственно. Среднегодовой AOD наблюдается низким ($< 0,10$) в Тихом океане, но изменяется пространственно и сезонно в Атлантическом и Индийском океанах (рисунок 6.1). Участок Кабо - Верде и Барбадоса в Атлантическом океане

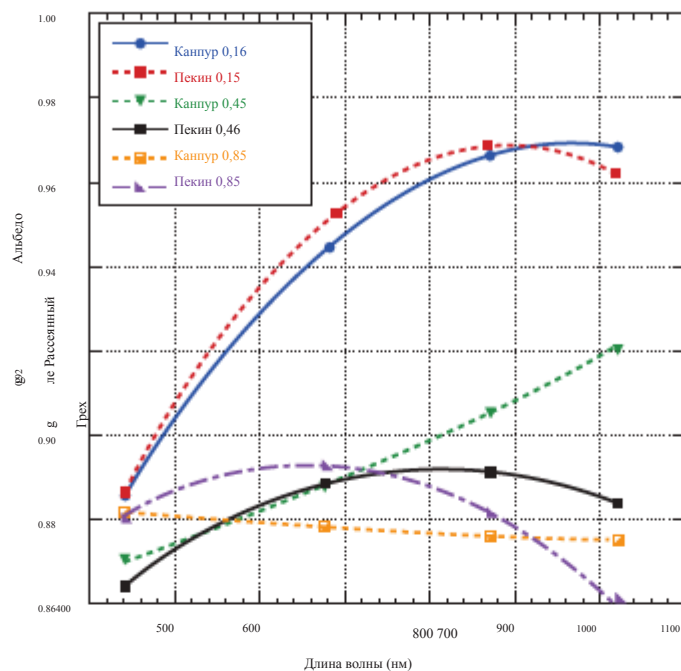


Среднегодовое значение (а) AOD при 500 нм и (б) Ангстрем-параметр в различных точках Рисунок

6.1 сайты AERONET на островах. Воспроизведено с разрешения Смирнова. et al. (2009). Копия-справа © 2009, John Wiley and Sons Ltd. Цветную версию смотрите в разделе "Табличка".

Океаны сильно подвержены переносу сахарской пыли, в то время как участок Кашидху в Индийском океане подвержен переносу загрязняющих веществ с Индийского субконтинента.

АЭ, полученная на основе спектральных измерений AOD наземными радиометрами, также обеспечивает качественную индикацию преобладающего размера, при этом значения больше 2 указывают на мелкие частицы, связанные с продуктами сгорания, а значения меньше 1 указывают на крупные частицы, такие как пыль или морские аэрозоли (Schuster, Dubovik, and Holben, 2006). Временные изменения доминирующих типов аэрозолей предполагаются на основе изменений АЭ (Dey *et al.*, 2004; Мурти, Бабу и Сатиш, 2007; Каскаутис *et al.*, 2010). Однако АЭ также изменяется с длиной волны, и АЭ второго порядка (количественная оценка изменения АЭ с длиной волны) предоставляет дополнительную информацию о распределении аэрозоля по размерам. Например, АЕ, рассчитанный по парам с большей длиной волны ($\lambda = 670$ и 870 нм), чувствителен к фракции мелкой моды, в то время как АЕ, рассчитанный по парам с меньшей длиной волны ($\lambda = 380$ и 440 нм) чувствителен к эффективному радиусу тонкой моды (Шустер, Дубовик и Холбен, 2006). Кривизна спектрального распределения AOD сильно зависит от атмосферной мутности (Кедия и Рамачандран, 2009). При низком AOD (≈ 0.2) АЕ увеличивается в четыре раза при изменении диапазона длин волн с более коротких (400-500 нм) на более длинные (750-875 нм). Изменчивость становится высокой, когда происходит смешивание различных видов аэрозоля, изменяя спектр аэрозольных свойств и поглощения. Анализ многолетних данных AERONET на двух городских объектах в Азии (Канпур и Пекин) выявил аналогичное спектральное изменение SSA при низкой (≈ 0.15) доле мелкодисперсного излучения (рисунок 6.2). Это свидетельствует о доминировании степи пылевые частицы-частицы в таких городских объектах, которые имеют сходные гематит содержание несмотря на различия в пыли источник регионах (Эк *et al.*, 2010). Оба этих участка имеют почти одинаковый SSAs с высоким содержанием (≈ 0.85) мелкодисперсной фракции, что указывает на схожую природу городских аэрозолей. При промежуточной фракции мелкодисперсного режима (≈ 0.45), характерной для смешения частиц мелкодисперсного и крупного режимов, SSA на длине волны ближнего инфракрасного диапазона в Пекине меньше, чем в Канпуре. Это означает, что частицы пыли крупного помола в Пекине поглощают больше, чем в Канпуре, что может быть результатом большего количества покрытия частиц пыли сажей (BC) в Пекине. В другом разделе



Сравнение спектральных SSA в Каннуре (26.5°N , 80.2°E) и Пекин (39.9°N ,

116.4°E) для низких (~ 0.15), средних (~ 0.45), и высоких (~ 0.85) дробей в мелком режиме. Воспроизводится

с разрешения Eisk. et al. (2010). Авторское право © 2010, Американский геофизический

союз. Цветную версию смотрите в разделе с таблицей.

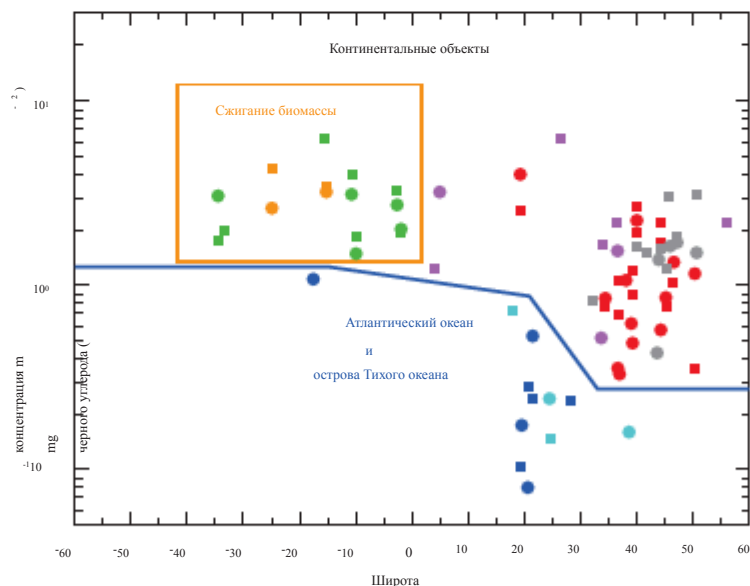
Исследование на основе AERONET, Джайлс *et al.* (2012) наблюдали более высокое поглощение частицами пыли, смешанными с дымом, чем чистой пылью.

6.2.1.2 Аэрозольная Композиция

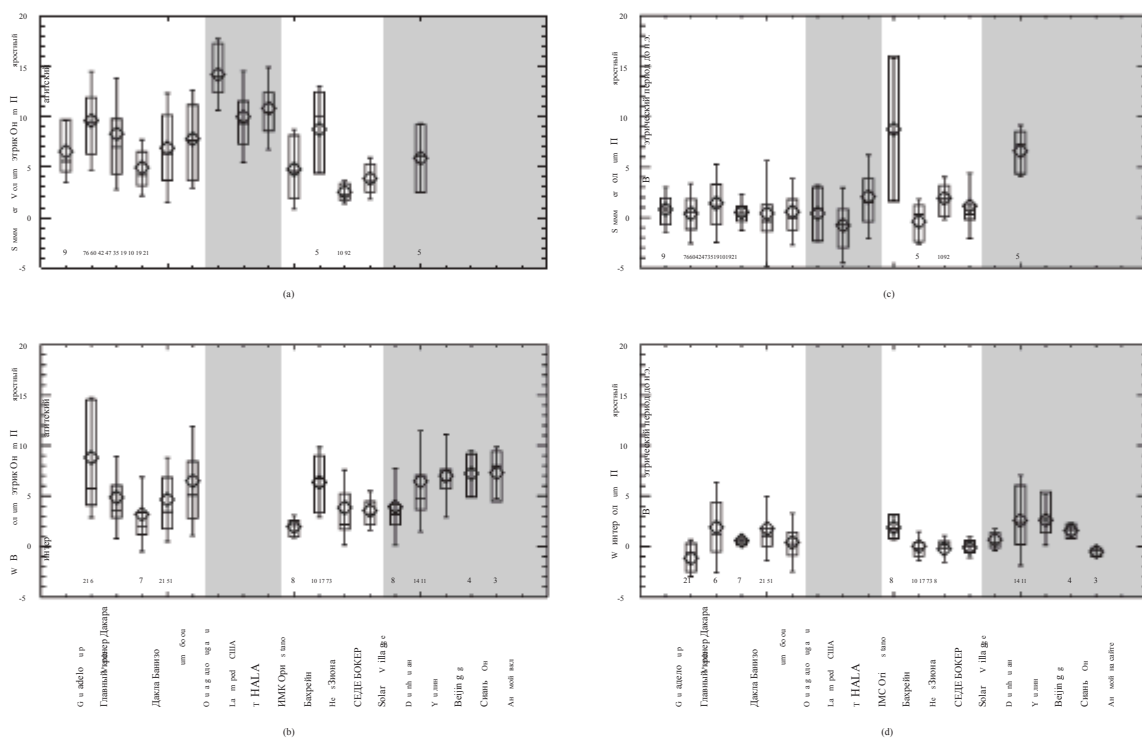
Нехватка данных о составе аэрозоля в глобальном масштабе препятствует совершенствованию климатических моделей, и это побудило ученых изучить возможность использования измеренных спектральных оптических свойств аэрозоля (с помощью солнечных фотометров или любых других радиометров) для определения состава аэрозоля. В последние годы были приняты два разных подхода. В первом случае для определения состава аэрозоля используется комбинация параметров аэрозоля. Например, Gobbi *et al.* (2007) предложили метод характеристики городских аэрозолей, аэрозолей, образующихся при сжигании биомассы, и пылевых аэрозолей с использованием спектральных кривизн AOD и AE (показателя доминирующего размера аэрозоля). Измерения тонкой фракции и SSA с помощью солнечных фотометров используются для разделения пыли, морских, непоглощающих и поглощающих антропогенных аэрозолей (Lee *et al.*, 2010). Статистика показывает, что в Северной и Южной Азии, Южной Америке и Южной Африке преобладают поглощающие аэрозоли, выбрасываемые в результате антропогенной деятельности и сжигания биомассы (ежегодные выбросы составляют 66,2, 89,2, 76,8 и 94,5% соответственно). Выбросы пыли из пустыни Сахара преобладают в воздушной массе Северной Африки (73,8% в год), в Северной Америке преобладают неабсорбирующие городские / промышленные аэрозоли, в то время как в Европе воздушные массы смешанные. Аналогичного подхода придерживался и Шривастава *et al.* (2012) различать воздушные массы, в которых преобладают различные типы аэрозолей (например, загрязненная пыль, чистая пыль, загрязненный

континентальный, с высоким и низким уровнем поглощения) над загрязненным Индо-Гангским бассейном в Северной Индии в сезон перед муссонами (март-май).

При втором подходе предполагается, что композитные аэрозоли представляют собой смесь различных отдельных видов. Составные показатели преломления оцениваются теоретически путем варьирования объемных долей отдельных компонентов, ограниченных полученными с помощью AERONET показателями преломления. Затем объемные доли умножаются на плотность интересующих видов и общую объемную концентрацию, полученную с помощью AERONET, для получения столбчатой массовой концентрации. Schuster *et al.* (2005) реализовали эту идею, применив правило смешивания Максвелла-Гарнетта к аэрозольной смеси, содержащей ВС, сульфат аммония, и воду, и рассчитали комплексные показатели преломления. Моделирование, ограниченное измерениями AERONET, позволило оценить столбчатые концентрации ВС на 46 объектах AERONET по всему миру. Наибольшие концентрации ВС на участках сжигания биомассы и наименьшие концентрации на удаленных островных участках (рис. 6.3) качественно оправдывают этот подход. Дей. (2006) расширили методологию, включив в смесь частичное поглощение органического углерода *et al* и пыли, чтобы изучить их влияние на извлечение ВС на участке в Индо-Гангском бассейне на севере Индии. Поглощающие органические концентрации углерода также были количественно определены с использованием того же подхода (Arola *et al.*, 2011). Ковен и Фунг (2006) применили подход для определения содержания гематита (который определяет абсорбционную природу пыли) в пылевых аэрозолях на площадках AERONET, где преобладает пыль пустыни. Они пришли к выводу, что расчетное содержание гематита очень чувствительно к допущениям о смешивании. Внешнее перемешивание завышает содержание гематита, в то время как внутреннее перемешивание занижает его (рисунок 6.4). В пыли Сахары и Восточной Азии наблюдается более высокое содержание гематита, чем в арабской пыли. Эти результаты обеспечивают альтернативный подход (при отсутствии надежных данных). *in situ* данные) для улучшения количественной оценки поглощения пыли и ее влияния на прямое радиационное воздействие.



Концентрация сажи (ВС) на различных объектах AERONET в Северной Америке- Рисунок 6.3
ика (красный), Европа (серый), Азия (фиолетовый), Южная Америка (зеленый), Африка (оранжевый), Атлантические
острова (светло-голубой) и острова Тихого океана (темно-синий) за 2000 год (круги) и 2001 год
(квадраты). Воспроизведено с разрешения Шустера *et al.* (2005). Авторское право © 2005, Американский
Геофизический союз *isap*. Цветную версию смотрите в разделе "Табличка".



Содержание гематита в аэрозолях на различных станциях AERONET в летне-осенний сезон (верхняя панель) и зимне-весенний период

Рисунок 6.4 сезон (нижняя панель), с использованием внешнего (левая панель) и внутреннего микширования (правая панель). Воспроизведено с разрешения Ковена и Фунга (2006). Авторское право © 2006, Американский геофизический союз.

6.2.2 Активное Дистанционное Зондирование

Поверхностное пассивное дистанционное зондирование может предоставить информацию о свойствах столбчатого аэрозоля, но вертикальные профили аэрозолей могут быть измерены только с помощью активного дистанционного зондирования. Микроимпульсный лидар (MPL) является очень популярным прибором благодаря своей портативности, и на протяжении многих лет на объектах AERONET была создана сеть (the Micro-Pulse Lidar Network, MPLNET) (Welton *et al.*, 2001). MPL измеряет коэффициент обратного рассеяния аэрозоля профиль на длине волны 532 нм с очень высоким разрешением по вертикали (30-75 м). Калибровка системы MPL включает коррекцию функций последствия и перекрытия (Welton and Campbell, 2002). Наземные лидары используются для измерения аэрозольных профилей в Continuous и кампании режимы (Велтон *et al.*, 2000). В эксперименте в Индийском океане данные MPL использовались для выяснения временной эволюции высоты морского пограничного слоя в течение зимнего сезона. Наблюдалось, что аэрозоли в основном сосредоточены ниже высоты 1 км, в то время как коэффициент обратного рассеяния при затухании предоставил дополнительную информацию о типе отобранной воздушной массы (Welton *et al.*, 2002). Данные лидара также использовались для обнаружения слоев пыли и смешивания с другими сферическими частицами (Liu *et al.*, 2011a).

Эти наборы данных также являются ценным инструментом для оценки результатов активного дистанционного зондирования из космоса (например, Campbell *et al.*, 2012; Мисра *et al.*, 2012). Помимо этих исследований вертикальных профилей аэрозолей, лидарные данные также используются для уточнения спутниковых оценок приземных концентраций аэрозолей для исследований воздействия на здоровье (Liu *et al.*, 2011b).

6.3 Дистанционное зондирование со спутников

Спутники обеспечивают пространственно-временной охват, необходимый для мониторинга концентрации атмосферного аэрозоля в глобальном масштабе и дополняют наземный мониторинг. Спутниковые приложения дистанционного зондирования начали получать информацию о свойствах аэрозоля (например, AOD или индекс поглощения аэрозоля (AAI)) около 30 лет назад (Lee *et al.*, 2009). Мульти спектральный сканер (MSS) на борту технологического спутника Earth Resources Technology Satellite (ERTS-1) был первым датчиком, использованным для получения AOD (Griggs, 1975). Однако усовершенствованный радиометр с очень высоким разрешением (AVHRR) на борту спутника TIROS-N был первым, который был использован для определения действующих аэрозольных продуктов (Stowe *et al.*, 2002). Первоначально созданная для наблюдений за погодой, способность AVHRR измерять отраженное солнечное излучение в видимом и среднем инфракрасном диапазонах длин волн была использована для поиска аэрозолей. С тех пор был запущен ряд пассивных датчиков для измерения аэрозолей над океаном и сушей (рис. 6.5). Ранние пассивные датчики разрабатывались для других целей (например, для картирования общего содержания озона спектрометр TOMS был запущен на борту спутника Nimbus 7 для обнаружения озона, но его ультрафиолетовые (УФ) диапазоны использовались для измерения поглощающих аэрозолей), но их измерительные возможности использовались для определения свойств аэрозолей с переменным успехом. Наше понимание ограничений существующих датчиков при измерении свойств аэрозоля привело к разработке более надежных методов. Недавно для определения вертикального распределения аэрозоля был использован активный метод дистанционного зондирования, что придало дистанционному зондированию аэрозолей новое измерение. В этом разделе кратко описываются пассивные и активные применения дистанционного зондирования в исследованиях аэрозолей за последние 3 десятилетия.

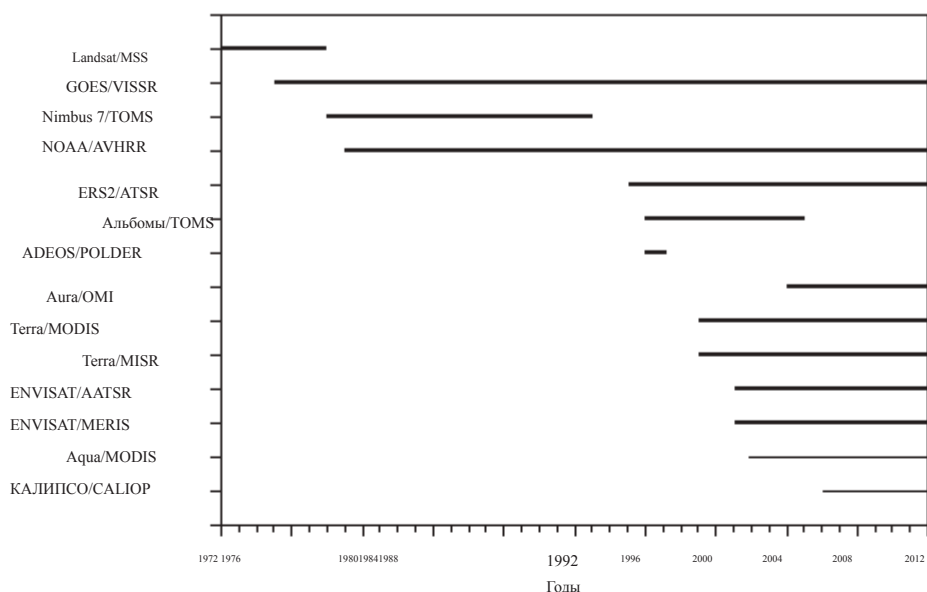


Рисунок 6.5 Временной охват различных спутников/датчиков, используемых для мониторинга аэрозолей.

6.3.1 Пассивное Дистанционное Зондирование

Спутниковые наблюдения проводятся с разных орбит, углов обзора и зенита солнца, которые меняются в зависимости от времени суток и сезона. Данные о свойствах аэрозоля с помощью пассивных датчиков, полученные со спутников, учитывают геометрию обзора в модели переноса излучения. Алгоритмы поиска состоят из нескольких этапов. Первый - это экранирование облаков, при котором пиксель идентифицируется как "чистый" или "облачный". Высокая отражательная способность облаков в пикселе перекрывает коэффициент отражения "аэрозоля", и, следовательно, аэрозоль не может быть обнаружен в облачном пикселе с помощью пассивного дистанционного зондирования (Аккерман *et al.*, 1998). Были разработаны различные методы маскировки облаков, на основе характеристик датчика. Следующий шаг - отделить коэффициент отражения поверхности от коэффициента отражения атмосферы при ясном небе. Вклад молекулярного рассеяния и поглощения в отражательную способность атмосферы оценивается с использованием модели переноса излучения. Для ускорения поиска подготовлены справочные таблицы (LUT), в которых излучение TOA теоретически рассчитано для набора моделей аэрозолей с учетом солнца и геометрии датчика. Затем свойства аэрозоля восстанавливаются путем сравнения измеренной яркости TOA с теоретическими значениями яркости, полученными из LUTs. Извлеченные аэрозольные продукты с высоким разрешением - удаление представлены как данные уровня 2. Все пиксели уровня 2 в более крупном домене (обычно в сетках $1,0^\circ$ или $0,5^\circ$) усредняются и представляются в виде данных уровня 3, которые распределяются по "ежедневным" и "ежемесячным" временным шкалам. Дистанционное зондирование аэрозолей в настоящее время осуществляется с использованием ультрафиолетового излучения и длин волн в видимой и ближней инфракрасной областях (VIS-NIR).

6.3.1.1 Дистанционное зондирование аэрозолей с использованием ближнего ультрафиолетового излучения

Способность обнаружения аэрозолей в диапазоне длин волн, близких к ультрафиолетовому излучению, впервые стала очевидной с разработкой ААИ как побочного продукта озонового алгоритма TOMS версии 7 (McPeters *et al.*, 1996). Низкое и относительно неизменное УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ альbedo поверхности Земли позволяет легко обнаруживать аэрозоли над океаном и сушей (Herman and Celarier, 1997). TOMS обеспечивает

ежедневный охват большей части поверхности Земли с разрешением 50×50 км в надире. Аэрозольные измерения проводятся на трех самых длинных длинах волн (340, 360 и 380 нм), при которых поглощение газа является слабым, а на обратное рассеяние излучения в первую очередь влияют рэлеевское рассеяние, поверхностное отражение и рассеяние от аэрозолей и облаков. AAI определяется как:

$$AAI = \frac{1}{100} \frac{J_{340}^{расчет} - J_{340}^{измерения}}{J_{380}^{расчет}}$$

это место, где J_{meas} - измеренное

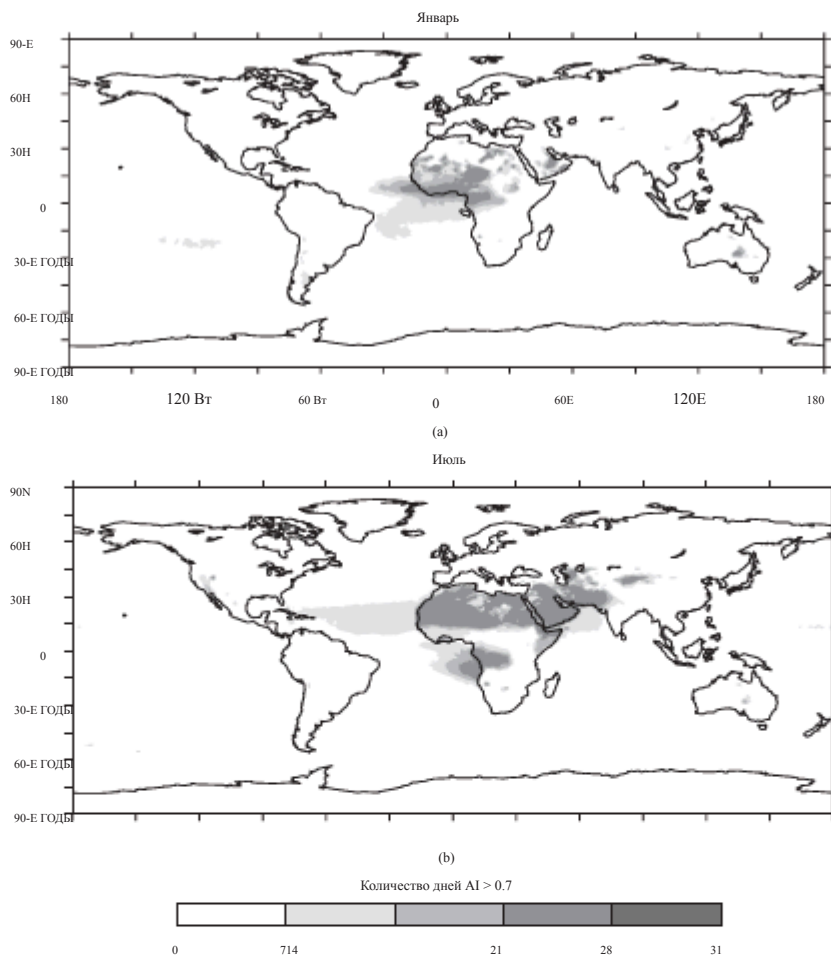
излучение, рассчитанное теоретически на этой длине волны с использованием атмосферной модели, предполагающей чистую газообразную атмосферу. Разница между измеренной и рассчитанной яркостью объясняется аэрозолями (при ясном небе). Непоглощающие аэрозоли (например, сульфаты и морские частицы) дают отрицательные значения AAI, в то время как поглощающие аэрозоли (например, пыль и дым) дают положительные значения.

AAI чувствителен к высоте аэрозольного слоя (Mahowald and Dufresne, 2004) и, следовательно, широко использовался при изучении глобального распределения поглощающих ультрафиолетовое излучение аэрозолей минеральной пыли. Используя данные TOMS AAI за 13 лет, Prospero *et al.* (2002) определили основные глобальные источники пыли на основе частоты высокого AAI (>0.7). В глобальном масштабе концентрация поглощающих аэрозолей в июле выше, чем в январе (рис. 6.6), а крупные источники сосредоточены в северном полушарии. Поглощающие аэрозоли представляют собой в основном минеральную пыль, за исключением южной Африки и прилегающего океана, где высокие значения AAI приписываются дыму (Hao and Liu, 1994). Этот индекс также был использован для изучения регионального распределения пыли (например, Dey *et al.*, 2004) и smoke (например, Глисон, Хсу и Торрес, 1998).

В дополнение к AAI, AOD также извлекается с использованием длин волн ультрафиолетового излучения (Torres *et al.*, 1998). Излучение, измеряемое датчиком в верхней части насыщенной аэрозолем атмосферы, состоит из трех составляющих: излучение, рассеянное вверх аэрозольным слоем, доля рассеянного по Рэлею и отраженного от поверхности излучения ниже аэрозольного слоя и доля рассеянного по Рэлею и отраженного от поверхности излучения, прошедшего через аэрозольный слой, на которую не влияет поглощение аэрозолем (Torres *et al.*, 2002). Дистанционное зондирование аэрозолей в ближней ультрафиолетовой области отличается от дистанционного зондирования в видимой / ближней инфракрасной области в двух аспектах: во-первых, рэлеевского рассеяния в общую яркость нельзя пренебрегать в ближней ультрафиолетовой области и варьируется в зависимости от высоты поглощающего и рассеивающего слоя аэрозоля; и, во-вторых, низкая отражательная способность поверхности в ближней ультрафиолетовой области позволяет извлекать аэрозоли с использованием аналогичных алгоритмов как над водой, так и над сушей с меньшей ошибкой. Поскольку чувствительность TOA radiance к высоте аэрозоля снижается с уменьшением поглощения аэрозоля, дистанционное зондирование в диапазоне ближнего ультрафиолетового излучения наиболее подходит для обнаружения поглощающих аэрозолей (Torres *et al.*, 1998).

Самый продолжительный мировой рекорд AOD получен при поиске аэрозоля с использованием метода дистанционного зондирования в ближнем ультрафиолетовом диапазоне датчиком TOMS на борту Nimbus 7 (октябрь 1978 -апрель 1993), Meteor-3 (август 1991-декабрь 1994) и EP-TOMS (июль 1996 -декабрь 2005).

На рисунке 6.7 показана межгодовая изменчивость широтного распределения AOD ближнего ультрафиолетового диапазона, которая отражает широкие региональные особенности. Высокий AOD при $\sim 50^\circ$ с.ш. соответствует бореальным лесным пожарам, в то время как сжигание тропической биомассы и пыль в пустынях способствуют высокому AOD в тропиках. Влияние двух крупных извержений вулканов (Эль-Чичон в 1982 году и гора Пинатубо в 1991 году) на глобальный AOD также очевидно. Этот набор данных может быть использован для дальнейшего исследования регионального масштаба (например, Мэсси, Торрес и Смит, 2004).



Глобальное распределение пыли и дыма: ежемесячная частота появления **Рисунок**

6.6 Аэрозольный продукт, поглощенный TOMS, за период 1980-1992 гг. (а) январь. (б) июль.

Шкала представляет собой количество дней в месяце, в течение которых индекс поглощения аэрозоля (AI) равен или превышает 0,7. Большая темная область на юге Африки в июле является результатом сжигания биомассы. В январе в регионе к северу от экватора в Африке горит биомасса; часть шлейфа над экваториальным океаном образуется из-за дыма. По сути, все остальные распределения являются результатом пыли (Chen, 2002). Авторское право © 2002, Американец. Воспроизведено с разрешения Геофизического союза Prospero.

6.3.1.2 Дистанционное зондирование аэрозоля с использованием VIS-NIR

Пассивное дистанционное зондирование аэрозолей на основе спутников с использованием длин волн в видимой ближней части спектра с годами приобрело известность благодаря простому использованию AOD в диапазоне средней видимости в климатических приложениях. Однако для воды и суши используются разные методы поиска, чтобы учесть эффект отражения поверхности.

Набор данных GACP. Приборы AVHRR на борту метеорологических спутников NOAA являются еще одним источником долгосрочных данных о свойствах аэрозоля. Излучения каналов 1 и 2 AVHRR использовались для получения AOD и AE над мировыми океанами и были заархивированы как Набор данных Глобального проекта аэрозольной климатологии (GACP), охватывающий период с августа 1981 по

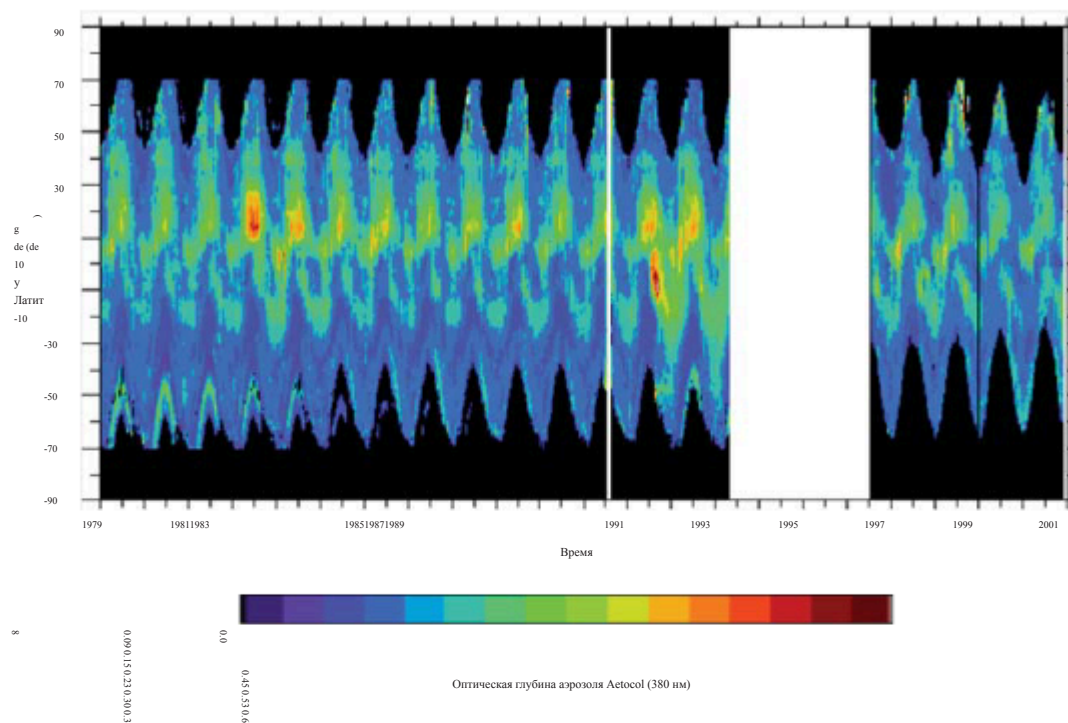


Рисунок 6.7. Временные ряды оптической глубины аэрозоля 380 нм за период эксплуатации

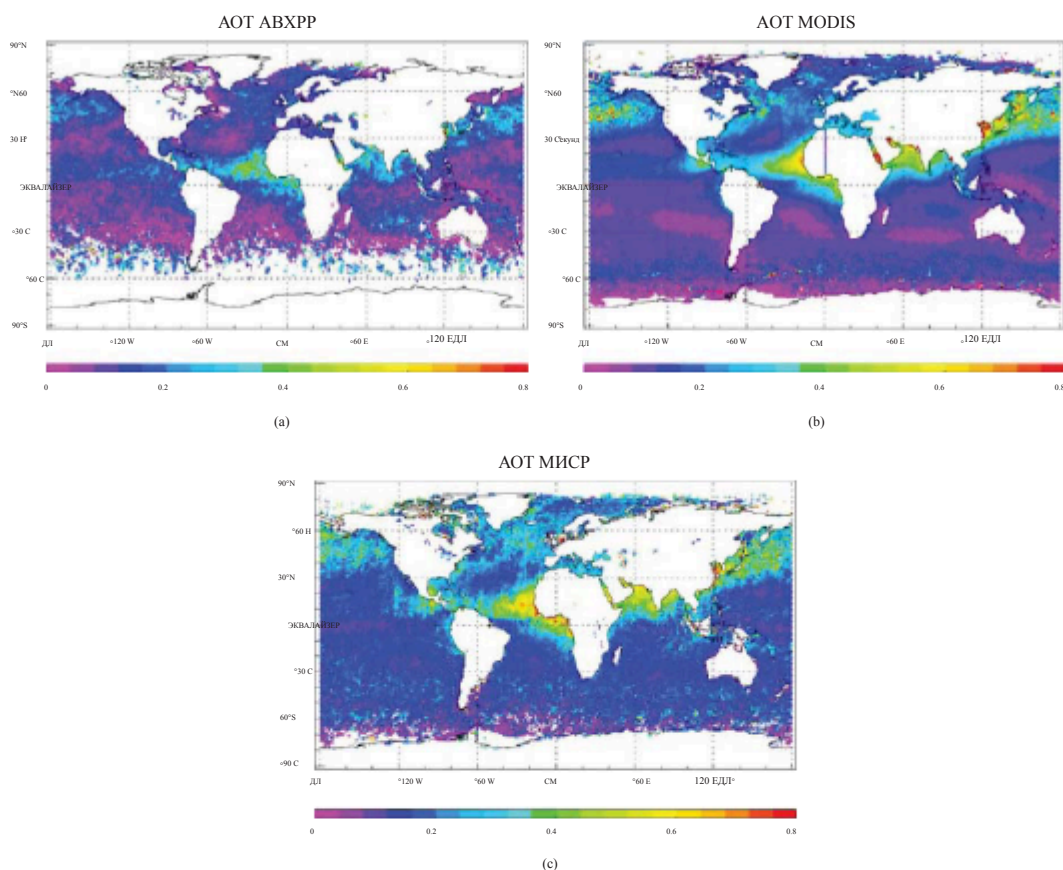
приборов TOMS на борту спутников Nimbus 7 (1979 - 1992) и Earth Probe (1996-2001).

Средние значения за неделю нанесены на график $1^\circ \times 1^\circ$ географическая сетка. Воспроизведено по Torres et al(2002) (с разрешения Американского метеорологического общества). Цветную версию смотрите в разделе "Таблички".

Декабрь 2005 (Мищенко *et al.*, 1999, 2007а, 2012; Геогджаев *et al.*, 2002, 2005).

Алгоритм GACP основан на модифицированном степенном распределении размеров в диапазоне 0,1 - 10,0 мкм (Мищенко *et al.*, 1999), где предполагается, что частицы представляют собой идеальные сферы со сложным показателем преломления $m = 1.5 + 0.003i$. Этот подход сводит к минимуму долгосрочные статистические ошибки полученных AOD и AE, но может иметь региональные отклонения из-за смешивания аэрозолей из различных источников.

AOD, полученный с помощью AVHRR, показывает аналогичное глобальное распределение (рисунок 6.8) AOD, полученному с помощью спектро радиометра изображений среднего разрешения (MODIS) и многоугольного спектро радиометра изображений (MISR), которые используют алгоритмы многоканального поиска. Все три датчика фиксируют потоки пыли из пустыни Сахара в Атлантический океан и крупные скопления над Индийским океаном, недалеко от побережья и Восточной Азии. Однако величина AOD варьируется; AVHRR показывает меньшую AOD, чем два других датчика, в регионах с высокой AOD, подверженных воздействию пыли и переносимых континентальных аэрозолей. Различные алгоритмы скрининга облаков и поиска, используемые этими датчиками, также могут вносить свой вклад в расхождение (Геогджаев, 2004; Мищенко *et al.*, 2007а). Тем не менее, набор данных GACP предоставляет ценный долгосрочный отчет об AOD в мировом океане. В более поздней работе Мищенко *et al.* (2012) показали, что увеличение комплексной части показателя преломления в алгоритме AVHRR устраняет ранее выявленную долгосрочную тенденцию к снижению глобальной AOD (Мищенко *et al.*, 2007b). Это означает, что для реальной тенденции, среднее глобальное поглощение аэрозоля должно быть удвоено по сравнению с существующим алгоритмом, что приводит к снижению среднего глобального SSA с $\sim 0,95$ до $\sim 0,88$.



Глобальное распределение оптической глубины аэрозоля за период с марта по июль 2000 г. Рисунок

6.8 данные трех пассивных датчиков: AVHRR, MODIS и MISR. Воспроизведено с разрешения

Геогджаева et al. (2002). Авторское право © 2004, Elsevier Ltd. Цветную версию смотрите в разделе "Табличка".

Аэрозольные продукты MODIS и MISR. Новая эра в спутниковом дистанционном зондировании аэрозолей

началась с запуска спутника EOS-Terra на полярной орбите в 1999 году

(рис. 6.5). EOS-Terra оснащена пятью датчиками, среди них MODIS и MISR, которые обеспечили

первое по-настоящему глобальное покрытие AOD. Позже, в 2002 году, MODIS был также запущен на борту

спутника Aqua, тем самым увеличив временной охват. MODIS измеряет излучение в

36 диапазонах длин волн (от 0,415 до 14,5 мкм) в пределах полосы ≈ 2330 км

при умеренно высоком пространственном разрешении (0,25, 0,5 и 1,0 км, в зависимости от диапазонов).

Алгоритм поиска аэрозоля MODIS "темная цель" был разработан для количественной оценки свойств аэрозоля при ясном небе (AOD и фракция мелкодисперсного излучения) над наземными поверхностями с низкой отражательной способностью (Levy, Remer, and Dubovik, 2007). Алгоритм использует два видимых (0,47 и 0,65 мкм) и один коротковолновый инфракрасный (SWIR, 2,1 мкм) диапазона, которые почти прозрачны для поглощения газом и демонстрируют стабильную спектральную зависимость на поверхности суши (Кауфман *et al.*, 1997). Аэрозоль рассматривается как смесь частиц мелкого и крупного помола, микрофизические и оптические свойства которых получены на основе кластерного анализа данных AERONET (Леви, Ремер и Дубовик, 2007). Алгоритм рассматривает три модели мелкодисперсного аэрозоля, которые предполагают сферические частицы со слабым (SSA при 0,55 мкм $\approx 0,95$), умеренным поглощением ($SSA \approx 0,91$) и сильным ($SSA \approx 0,86$) поглощением, и одну грубую модель, которая предполагает несферические частицы с $SSA \approx 0,95$ (по существу представляющие пыль). LUT создается в

в котором значения яркости TOA для различных моделей аэрозолей плюс рэлеевское рассеяние на темной поверхности теоретически оцениваются с использованием модели переноса излучения. Ранее (коллекция 4) алгоритм предполагал незначительный вклад излучения аэрозолей в канале размером 2,1 мкм, позволяя отделить коэффициент отражения поверхности от коэффициента отражения аэрозоля в двух видимых каналах при простом соотношении коэффициентов отражения поверхности в каналах VIS и SWIR (Remer *et al.*, 2005). Излучение TOA от LUT сравнивается с измеренным излучением в каналах 0,47 и 0,65 мкм для получения AOD, которое затем интерполируется для вычисления AOD при 0,55 мкм и передается как данные уровня 2.

Настоящий алгоритм (коллекция 5) учитывает спектрально согласованное атмосферное излучение для каждой модели аэрозоля в сочетании с рэлеевским рассеянием (Леви, Ремер и Дубовик, 2007), что позволяет получать AOD прямого поиска при 0,55 мкм и мелкой моде. АЭ определяется по результатам измерений AOD при 0,47 и 0,65 мкм. Аэрозольный продукт MODIS collection 5 представлен как данные уровня 2 с пространственным разрешением 10 км. Наряду с аэрозольными продуктами также сообщается о качестве извлечения (обозначаемом QA) на основе серии тестов в форме флага контроля качества (QAC). QAC суммирует относительную достоверность для всего аэрозольного продукта в диапазоне от 0 (низкая достоверность или ее нет) до 3 (высокая достоверность). Большие значения QAC более полезны в научных приложениях описаны в разделе 6.3.3.

Глобальная проверка предыдущей версии аэрозольного продукта (Remer *et al.*, 2005) показала, что это > 66% или одно стандартное отклонение наземных точек коллокации содержалось в пределах ожидаемой ошибки (т.е. $\pm[0,05 + 0,15 \text{ AOD}]$). В коллекции 5 69% извлеченных AOD находятся в пределах ожидаемой погрешности, с более близким соответствием строке 1 : 1 и более высокой корреляцией по сравнению с коллекцией 4. Однако категоризация извлеченных AOD с использованием QAC при глобальной проверке показала, что регрессия становится более симметричной с линией 1 : 1 с увеличением QAC и что процент точек данных, лежащих в пределах ожидаемой погрешности, увеличивается с 50,34% для QC = 0 до 66,1, 67,75 и 72,6% для QAC = 1, 2 и 3 соответственно (Леви *et al.*, 2010). Изменение смещения в MODIS- AOD по сравнению с AERONET показано на рисунке 6.9 для всех совмещенных точек данных QAC = 3. В широком диапазоне AOD среднее отклонение (отмечено черными прямоугольниками) MODIS- AOD составляет менее 0,01, а интервал составляет 66% (т.е. 1 - σ показаны красными линиями) и ожидаемые огибающие ошибок (показаны зелеными линиями) практически идентичны. Это еще раз подтверждает важность флага качества для научных приложений.

MISR, запущенный на борту спутника NASA EOS-Тетра (совместно с MODIS), уникален тем, что обладает сочетанием высокого пространственного разрешения, широкого диапазона углов обзора вдоль трассы, а также высокой точностью радиометрической калибровки и стабильностью (Diner *et al.*, 1998). MISR измеряет восходящее коротковолновое излучение при 446, 558, 672 и 867 нм с помощью девяти камер, расположенных в переднем и кормовом направлениях вдоль траектории полета при 70,5°, 60,0°, 45,6°, 26,1° и надире. Полоса земли шириной 380 км последовательно просматривается каждой из девяти камер в течение 7 минут, что позволяет измерять очень большой диапазон углов рассеяния, который позволяет восстановить микрофизические свойства аэрозоля (Kahn *et al.*, 2010). Многоугольный обзор повышает чувствительность к оптически тонким слоям аэрозоля и позволяет алгоритму поиска различать влияние поверхности и атмосферы на излучение TOA.

MISR извлекает AOD и другие микрофизические свойства (размер и форма частиц и SSA) с разрешением 17,6 × 17,6 км в качестве продукта уровня 2 путем анализа данных с разрешением 16 × 16 пикселей с разрешением 1,1 км (Kahn *et al.*, 2009). Стратегия поиска предполагает горизонтальное однородное распределение аэрозолей в области размером 17,6 × 17,6 км, поэтому поиск невозможен

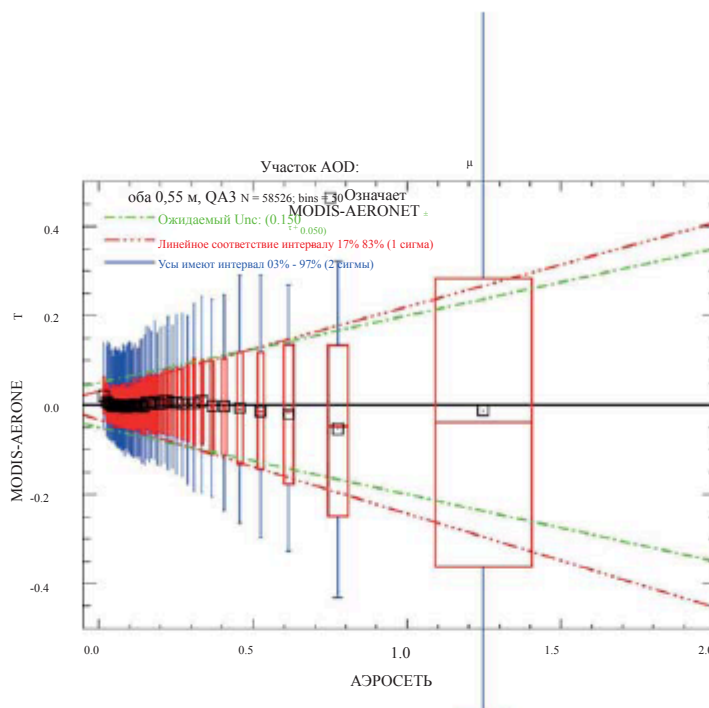


Рисунок 6.9 Абсолютная погрешность AOD (MODIS-AERONET) по сравнению с AERONET-AOD составляет 0,55 μm .

0,55

3. Данные отсортированы по AOD AERONET и сгруппированы в 50 равных ячеек. Каждая прямоугольная диаграмма представляет статистику различий MODIS-AERONET в ячейке. Средними значениями и стандартными отклонениями AOD AERONET являются центры и полуширины по горизонтали (красный). Среднее значение, медианы и 66% (1 -) интервалы различий MODIS-AERONET представляют собой черные квадраты с красными интервалами по вертикали в центре и сверху - снизу (тоже красными).

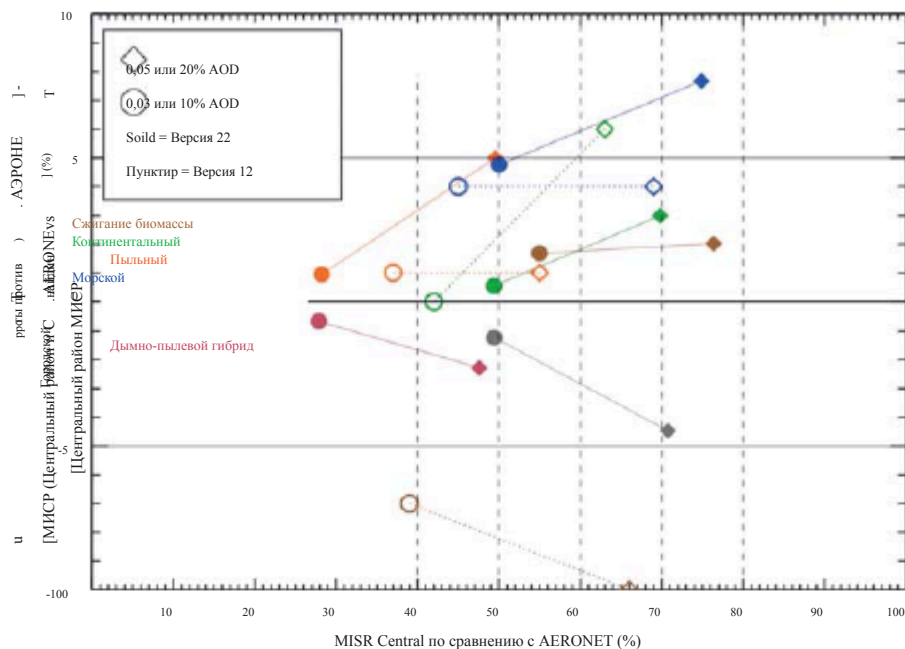
Синие бакенбарды составляют 96% (2 -) интервалы. Красные пунктирные кривые лучше всего соответствуют линейным интервалам и зеленые пунктирные кривые представляют собой ожидаемые ошибки на суше от общего числа до 1. -

(0,05 0,15). Воспроизведено с разрешения Леви et al. (2010). Авторское право © 2010,

Леви et al. Цветную версию смотрите в разделе "Табличка".

выполняется на суше, когда определено, что рельеф поверхности сложный (например, в горной местности). Последний (версия 22) алгоритм предполагает 74 типа моделируемой аэрозольной смеси в LUT. Яркость каждой из этих смесей сопоставляется с измеренной яркостью, и свойства частиц смеси с наименьшим значением хи-квадрат из всех смесей, успешно прошедших пороговый тест при сопоставлении яркости, сообщаются как "наилучшие оценки". Аэрозольный продукт включает спектральный AOD и SSA во всех четырех MISR каналы, доля AOD из-за "мелкого" (радиус частиц $< 0,35 \text{ мкм}$), "среднего" (радиус от 0,35 до 0,7 мкм) и "крупный" размер (радиус $> 0,7 \text{ мкм}$), а также доля AOD, обусловленная "сферическими" и "несферическими" частицами (Кан et al., 2009). Эта версия улучшена по сравнению с предыдущими версиями за счет включения более реалистичного среднережимного режима desert dust (Kalashnikova et al., 2005), сферические частицы со средним видимым SSA в диапазоне 0,8 - 0,9, и более мультимодальные распределения по размерам, среди прочего. Многие из этих объектов уникальны для МИСР.

Глобальная проверка MISR AOD представлена на рисунке 6.10, где 3,7% данных являются выбросами и не включены в статистику. Большинство выбросов связано с выборкой



Смещение MISR AOD относительно AERONET (в %) для всех совпадающих стратифицированных образцов **Рисунок**

6.10 в соответствии с преобладающим типом аэрозольной воздушной массы. Заполненные ромбы и круги представляют усредненный по классу процент соответствия регулярному ($0,05$ или $20\% \times AOD$) и более строгие ($0,03$ или $10\% \times AOD$) критерии соответственно. Открытые символы представляют средние результаты по классу для более ранней версии продукта от Kahn et al. (2005). Рисунок адаптирован по книге Kana et al. (2010) (с разрешения AGU). Цветную версию смотрите в разделе "Табличка".

отличия (Кан et al., 2010). Качество извлечения варьируется в зависимости от основного типа аэрозоля. Например, 70-75% данных находятся в пределах $0,05$ или $20\% \times AOD$ от достоверных данных и около 50-55% соответствуют более строгим критериям, за исключением категорий "пыль" и "гибрид". Значения версии 22 на 10, 7 и 6% выше, чем в более ранних версиях для категорий "сжигание биомассы", "континентальная" и "морская" соответственно, что предполагает улучшения в поиске. Проверка также предполагает наличие требования к смеси дыма и пыли в LUT. Проверка с помощью AERONET показала, что MISR переоценивает параметры AE из-за отсутствия какого-либо канала длиной волны более 867 нм и ограниченного использования сферических частиц среднего размера в LUT. Как и MODIS, MISR также предоставляет дополнительную информацию (например, качество поиска, количество успешных смесей, прошедших тест хи-квадрат, флаг успешного поиска и т.д.), которая помогает понять качество поиска и интерпретацию данных для научных приложений.

Применимость и взаимное сравнение аэрозольных продуктов спутникового базирования. В связи с повышенным вниманием, уделяемым воздействию аэрозолей на климат, количество аэрозольных продуктов спутникового базирования за последнее десятилетие быстро возросло. В дополнение к датчикам, упомянутым в предыдущих разделах, многие другие датчики (например, SeaWiFS, VIRS, AATSR, ATSR-2, POLDER) также выдают аэрозольные продукты. Однако доступность множества наборов данных для аналогичных приложений также увеличивает вероятность неправильного толкования. Многие недавние исследования были сосредоточены на сопоставлении различных аэрозольных данных, полученных со спутников.

продукты и выявили большое расхождение между ними (например, Mühle *et al.*, 2004, 2005; Лю и Мищенко, 2008; Ли *et al.*, 2009; Мищенко *et al.*, 2009). Расхождение не является неожиданным, поскольку качество результатов поиска зависит от множества факторов (включая калибровку прибора, методы маскировки облаков, алгоритмы и обработку коэффициента отражения поверхности). Алгоритмы поиска с годами модифицировались для улучшения качества аэрозольного продукта, но среди сообщества пользователей все еще существует отсутствие надлежащей интерпретации качества данных и их применимости. Часто AOD от нескольких датчиков, усредненные по месячным или сезонным временным шкалам, сравниваются между собой без учета пространственной и временной плотности измерений относительно градиентов истинного AOD (Levy *et al.*, 2009).

Кан *et al.* (2009, 2011) продемонстрировали правильный подход к интерпретации взаимного сравнения с несколькими датчиками с использованием совпадающих выборок. Ключевыми вопросами, которые следует учитывать, являются: (i) сопоставление измерений, (ii) обработка выбросов и (iii) выбор абсолютного или относительного критерия в зависимости от конкретной ситуации. Например, несмотря на то, что Terra, MISR и MODIS находятся на борту одного и того же спутника, они не получают AOD в одном и том же местоположении. Это может привести к различиям в выборке, особенно в регионах с большой пространственной изменчивостью AOD (Kahn *et al.*, 2011). Три группы выбросов в сравнении МИСР-МОДИС (рис. 6.6 Кана, 2009) соответствуют Севера, Центральной Африке, восточной части Индо-Гангского бассейна, пустыне Патагония в Южной Америке и Северо-Центральной Австралии. Несоответствие в Северной и Центральной Африке связано с отсутствием смеси дыма и пыли в алгоритме поиска MISR, в то время как ни MODIS, ни MISR не учитывают соответствующий SSA при поиске аэрозолей в Индо-Гангском бассейне. Третий кластер связан с ошибкой в обработке коэффициента отражения поверхности с помощью алгоритма MODIS land. Для прямого сравнения необходим абсолютный критерий при очень низком AOD, когда чувствительность датчика низкая. С другой стороны, относительный критерий полезен для сравнения AOD, значительно превышающих предел чувствительности измерений, чтобы учесть такие проблемы, как различия в выборках и пространственная изменчивость. Часто совместное использование MODIS и MISR обеспечивает лучшую информацию (например, Калашникова и Кан, 2008). Эти данные используются в различных приложениях, как описано в разделе 6.3.3.

6.3.2 Активный космический лидар

Одним из основных факторов, влияющих на качество определения свойств аэрозоля с использованием пассивных методов дистанционного зондирования, является воздействие облаков. Необнаруженные облака в пределах четких пикселей усиливают сияние TOA. Даже когда пиксель правильно идентифицирован как "чистый", на выделение аэрозоля в этом пикселе влияет повышенная отражательная способность от края облака (Вен, Маршак и Кахалан, 2006). Этот артефакт может повлиять на интерпретацию взаимодействия аэрозоля и облака на основе данных дистанционного зондирования (Леб и Шустер, 2008; Корен., 2007). Аэрозоль и облако могут быть одновременно обнаружены с точностью до пикселя с помощью активного дистанционного зондирования. Более того, активное дистанционное зондирование может предоставлять информацию о вертикальных профилях аэрозоля как днем, так и ночью, в отличие от дневного режима - определение свойств столчатого аэрозоля только с помощью пассивных датчиков.

CALIPSO был запущен на борту спутника CALIPSO в составе группировки спутников, известных в народе как "Поезд А" (Стивенс *et al.*, 2002) в 2006 году. Он измеряет вертикальные профили двух компонентов ортогональной поляризации ослабленного обратного рассеяния при 532 нм (при разрешении 30 м по вертикали и 1/3 км по горизонтали ниже высоты 8,2 км, и при разрешении 60 м по вертикали и 1 км по горизонтали между 8,2 и 20,2 км над уровнем моря) и

et al

об общем обратном рассеянии при длине волны 1064 нм (при разрешении 60 м по вертикали). Цветовое соотношение (соотношение обратного рассеяния 532 и 1064 нм) используется для различения аэрозоля и облаков. Кроме того, используя чувствительность коэффициента объемной деполяризации, VDR (отношение слоя, интегрированного перпендикулярно к параллельным компонентам обратного рассеяния длиной волны 532 нм) к неравномерности формы частиц, несферическую пыль можно отделить от других сферических частиц (Liu *et al.*, 2008). Сравнение с наземным лидаром показывает плохое соответствие ближе к поверхности, в первую очередь из-за неопределенности в предположении о соотношении лидаров в алгоритме CALIPSO в сочетании с низкой чувствительностью, поскольку сигнал ослабляется ближе к поверхности из-за присутствия тяжелого аэрозольного слоя в воздухе (Misra *et al.*, 2012).

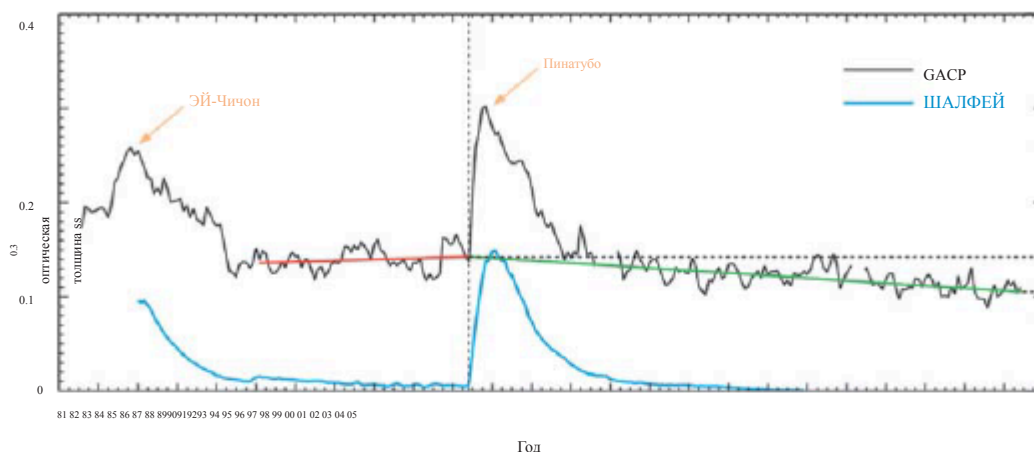
Тем не менее, измерения CALIPSO дают возможность изучить вертикальное распределение аэрозоля в глобальном масштабе, что имеет решающее значение для количественной оценки вызванного аэрозолем радиационного эффекта. Профили CALIPSO были использованы для изучения переноса аэрозоля (например, Liu *et al.*, 2008; Абди Вишкаи *et al.*, 2012; Cabello *et al.*, 2012; Ди Пьерро, Джегле и Андерсон, 2011), распределение аэрозоля (например, Чен *et al.*, 2012; Мишра и Шибата, 2012), аэрозольное радиационное воздействие (например, Чанд *et al.*, 2009), и валидация климатических моделей (например, Koffi *et al.*, 2012).

6.3.3 Применение аэрозольных продуктов спутникового базирования

Восприятие важности аэрозолей для климата земли изменилось в результате расширения возможностей датчиков нового поколения по измерению свойств аэрозолей в глобальном масштабе (Кауфман, Танре и Буше, 2000). Спутниковые аэрозольные продукты в настоящее время применяются для многочисленных научных целей (например, анализ временных рядов, определение характеристик аэрозоля в различных пространственных и временных масштабах, оценка радиационного воздействия аэрозоля, взаимодействие аэрозоля с облаком, проверка климатических моделей, концентрация аэрозоля у поверхности для исследований состояния здоровья). В этом разделе кратко излагаются эти приложения и обсуждаются предостережения относительно их применимости.

6.3.3.1 Характеристики аэрозоля, тенденции и радиационное воздействие

Аэрозольные продукты спутникового базирования (столбчатые и вертикальные распределения), обеспечивающие почти глобальный охват, помогли снизить неопределенность в отношении прямого радиационного воздействия аэрозолей, как это очевидно из AR3 МГЭИК (эра до Терры) и AR4 (эра после Терры). В то время как набор данных GACP предоставляет довольно долгосрочные (26 лет) данные о AOD в океанах, Аэрозольные продукты MODIS и MISR обеспечивают почти глобальные измерения свойств аэрозолей за последние 12 лет (и продолжаются). Эти данные были использованы в последнее десятилетие для улучшения нашего понимания пространственно - временного распределения свойств аэрозоля. Переход от глобального затемнения к прояснению в последние годы, как показали наземные измерения солнечной радиации (Wild *et al.*, 2005), довольно хорошо согласуется с тенденцией AOD, полученной из набора данных GACP (рисунок 6.11), где AOD показывает тенденцию к снижению в период с 1991 по 2006 год. Однако, как показали исследования, проведенные в региональном масштабе, глобальная тенденция к снижению AOD может быть неоднородной. Например, Дей и Ди Джироламо (2011) наблюдали растущую тенденцию в МИСП-АОД на Индийском субконтиненте за период 2000-2010 годов. Величина увеличения AOD в сезонных горячих точках вызывает тревогу (в диапазоне 0,1-0,4 за последнее десятилетие; рис. 6.12) и объясняется быстрым увеличением антропогенных частиц и дополнительным притоком пыли в сельских и океанических регионах, характеризующихся



Данные GACP по глобально усредненному столбцу AOD для океанов и Рисунок 6.11

Данные SAGE об усредненном по миру AOD в стратосфере. Воспроизведено с разрешения

Мищенко. et al. (2007b). Авторское право © 2007, Американская ассоциация содействия

развитию науки. Цветную версию смотрите в разделе "Табличка".

сочетание размера и формы частиц аэрозольного продукта MISR (Дей и Ди Джироламо,

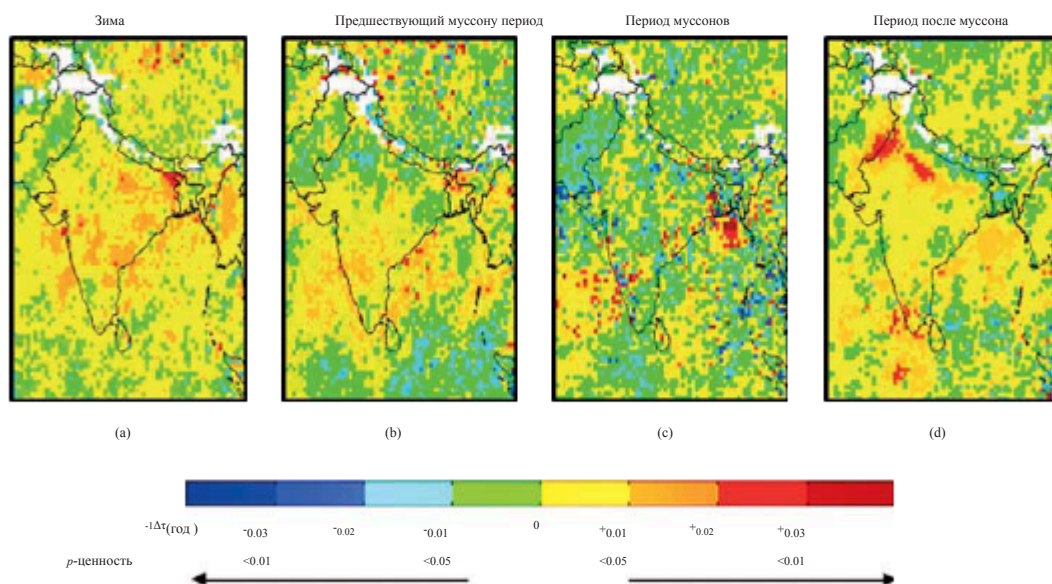
2010). Общие выводы подтверждаются другими исследованиями (например, Kishcha et al., 2011)

и продолжающимся затемнением в этом регионе (Кумари et al., 2007). Анализ тенденций с использованием спутниковых

данных требует осторожности, поскольку коэффициент отражения поверхности может меняться со временем из-за изменения

растительного покрова и землепользования и, следовательно, искажать результаты поиска AOD. Однако многоугольное

представление MISR обеспечивает одновременное получение данных об отражательной способности поверхности и AOD,



Сезонные аэрозольные очаги (значительные темпы увеличения AOD в год) на протяжении Рисунок

6.12 Индийский субконтинент за период 2000-2010 гг. Воспроизведено с разрешения Дея и

Ди Джироламо (2011). Авторское право © 2011, John Wiley and Sons Ltd. Цветную

версию смотрите в разделе "Табличка".

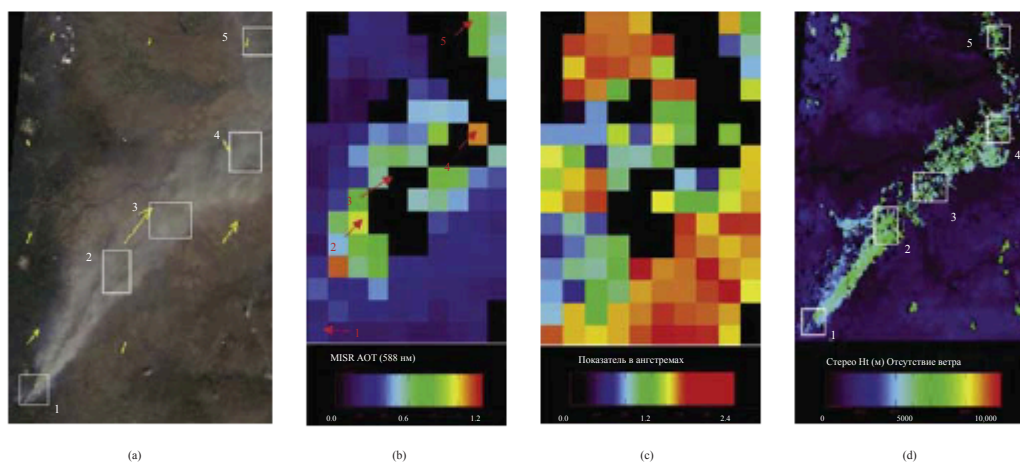
ограничение вероятности искусственного смещения при анализе тенденций. Спутниковые аэрозольные продукты также использовались для региональных целей (например, Рамачандран и Чериан, 2008; Xia *et al.*, 2008; Дей и Ди Джироламо, 2010; Марей *et al.*, 2011) и глобальные (например, Remer *et al.*, 2008; Лю и Мищенко, 2008) аэрозольная климатология.

Уникальный многоугольный обзор MISR дополнительно позволяет извлекать аэрозольный шлейф и отслеживать его перемещение (Kahn *et al.*, 2007). Сначала вычисляется средний ветер на уровне отражения с грубым разрешением (70,4 км). Затем выполняется сопоставление между видами 26° вперед и надир и независимо между видами 26° назад и надир, используя изображения красной полосы с пространственным разрешением MISR-275 м на каждом участке горизонтали протяженностью 1,1 км. Высота аэрозольного шлейфа рассчитывается для каждой носовой и кормовой пары на всем участке протяженностью 70,4 км. Вид надир в натуральную величину столба дыма, выбрасываемого лесным пожаром в штате Орегон, в надире в натуральную величину показан на рисунке 6.13а. Анализ был проведен для пяти участков, при этом очень высокий (в диапазоне 0,7 - 1,0) AOD (рис. 6.13b) был получен в регионе, где частицы имеют средний размер, как следует из значений AE (рис. 6.13c). Полученная высота шлейфа составляет 5 км (рис. 6.13d). Такой набор данных важен для понимания распределения загрязняющих веществ, которое является ключевым исходным материалом для моделей переноса аэрозолей (Kahn, 2008; Вэл Мартин)..... (*et al.* , 2010).

et al

Оценки радиационного воздействия аэрозолей улучшились в результате лучшей характеристики свойств аэрозоля с помощью спутникового дистанционного зондирования (Кауфман, 2006; Ю. *et al.*, 2006, 2004). Беллузи *et al.* (2005) количественно определили долю антропогенных факторов в общем объеме AOD, используя долю в тонком режиме, ограниченную измерениями AERONET и campaign. Они обнаружили, что прямое радиационное воздействие аэрозоля при ясном небе на TOA составило -1,9 Вт / м.² отличается от прогноза климатических моделей (от -0,5 до -0,9 Вт м.²). Несколько других исследований

, значительно



Пожар в Орегоне, 4 сентября 2003 г., орбита 19 753, путь 044, блоки 53-55, 19:00 Рисунок 6.13

UTC. (a) Вид огненного столба в надире MISR, с пятью местоположениями места исследования (патча), обозначенными пронумерованными белыми прямоугольниками, и векторами ветра, полученными из стереоизображения MISR, наложенными желтым цветом. (b) Столбец AOD средней видимости MISR (версия 17), полученный с пространственным разрешением 17,6 км, с местоположениями объектов исследования, обозначенными красными стрелками. Результатов поиска черных пикселей нет, в большинстве случаев из-за высокой AOD и изменчивости AOD ядра шлейфа. (c) полученный из MISR, показатель Ангстрем в среднем по столбцу для шлейфа и окружающей области. (d) Стереоизображение MISR по высоте (версия 13) без коррекции ветра (на рисунке обозначено "без ветра") для того же региона. Воспроизведено с разрешения Kahn. *et al.* (2007). Авторское право © 2007, John Wiley and Sons Ltd. Цветную версию смотрите в разделе "Табличка".

также использовали спутниковые аэрозольные продукты для снижения неопределенности в отношении аэрозольного радиационного воздействия на региональном уровне (например, Элиас и Ружан, 2008; Li *et al.*, 2010; Чанг *et al.*, 2010) и глобальные (например, Chung *et al.*, 2005; Чанг, Раманатан и Декремер, 2012; Куаас и Буше, 2005; Кристофер *et al.*, 2006; Quaas *et al.*, 2008) веса. Полезность спутниковых аэрозольных продуктов для ограничения основанных на моделях оценок прямого радиационного воздействия аэрозоля была обобщена Ю. *et al.* (2006).

6.3.3.2 Взаимодействие аэрозоля, облака и осадков

Аэрозольные продукты спутникового базирования в сочетании с облачными продуктами также используются для изучения взаимодействия аэрозоля и облака, которое является крупнейшим источником неопределенности при оценке антропогенного воздействия на климат. Спутники дополняют скудные данные *наблюдений in situ*, чтобы помочь понять эту сложную проблему. Спутниковый подход основан на изменениях макрофизических (доля облаков и высота над уровнем моря) и микрофизических свойств облаков (фаза, эффективный радиус и путь прохождения воды) свойств в ответ на изменение характеристик аэрозоля. Были проведены детальные исследования для изучения воздействия аэрозолей на облака над Атлантическим океаном (Кауфман *et al.*, 2005; Корень *et al.*, 2005; Корен, Файнгольд, и Ремер, 2010), Амазонка (Коген, 2008; Джонс и Кристофер, 2010), Южная Азия (Чилек *et al.*, 2006; Трипати, Паттнаик и Дей, 2007; Джонс, Кристофер и Куаас, 2009; Дей *et al.*, 2011) и Африка (Леб и Шустер, 2008; Чанд *et al.*, 2009; Su *et al.*, 2010; Костантино и Бреон, 2010) с использованием спутниковых данных. Спутниковые аэрозольные продукты также использовались для изучения изменений осадков, вызванных аэрозолями (Sorooshian *et al.*, 2009, 2010; Дуонг, Сорошиан и Файнгольд, 2011; Корен *et al.*, 2012). Из этих исследований было сделано много интересных выводов, ранее неизвестных. Известные из них включают в себя усиление глубоких конвективных облаков в загрязненной среде и усиление дождя, переход от косвенного воздействия к полупрямому и зависимость восприимчивости осадков (т. е. Изменения количества осадков в ответ на возмущение аэрозоля) от пути прохождения воды в облаках.

Взаимосвязи между аэрозолем и облаками, наблюдаемые спутниками, также могут быть объяснены пассивными артефактами дистанционного зондирования, взаимозависимостью аэрозолей и облаков от синоптической метеорологии, и влиянием аэрозоля на поиск облаков и наоборот. Отделение метеорологического влияния на наблюдаемые свойства облаков от воздействия аэрозолей является наиболее сложной задачей при спутниковом подходе (Ломанн, Корен и Куафман, 2006; Леб и Шустер, 2008). Стивенс и Файнгольд (2009) рассмотрели существующие подходы к решению этой критической проблемы и пришли к выводу, что статистически значимые взаимосвязи между аэрозолем, облаками и осадками наблюдаются не всегда из-за буферного эффекта метеорологии, что еще больше усложняет проблему. Они выступают за обработку отдельных облачных систем, чтобы лучше количественно оценить воздействие аэрозоля. Важность режимных исследований взаимодействия аэрозоля и облака также подчеркивается Гриспирдтом и Стиром (2012). Артефакты пассивного дистанционного зондирования связаны с усилением AOD вблизи облаков из-за набухания аэрозолей во влажной среде, увеличенное количество аэрозолей в результате процессов генерации аэрозоля, необнаруженные субпиксельные облака, ограничения приборов и трехмерные радиационные взаимодействия между облаками и окружающими прозрачными областями (Варнай и Маршак, 2009; Редemann *et al.*, 2009; Маршак *et al.*, 2008; Корен *et al.*, 2007; Вен, Маршак и Кахалан, 2006). Количественная оценка относительного вклада этих факторов очень сложна. Такетт и Ди Джироламо (2009) проанализировали данные CALIPSO для количественной оценки относительного вклада 3D-эффектов в вызванное облаками усиление AOD вблизи облачных полей над Карибским бассейном

В Атлантике используются данные CALIPSO за ночное время. Аналогичные усилия требуются и в других регионах, особенно в тех, где преобладают небольшие кучевые облака, поскольку кучевые облака, как правило, меньше по размеру, чем разрешение по горизонтали 2-го уровня пикселей обычно используемых пассивных датчиков, и, таким образом, могут вызывать прямое загрязнение облаков при поиске аэрозоля (Myhre *et al.*, 2004).

6.3.3.3 Применение для контроля качества воздуха

Связь между качеством воздуха и здоровьем человека хорошо известна в литературе.

В последние годы нехватка наземных наблюдений в глобальном масштабе привела к расширению использования аэрозольных продуктов спутникового базирования при изучении качества воздуха (Gupta *et al.*, 2006; van Donkelaar *et al.*, 2010; Brauer *et al.*, 2012; Дей *et al.*, 2012; Купер *et al.*, 2012). Во всех этих исследованиях спутниковые измерения столбчатого AOD были преобразованы в поверхностную концентрацию мелких твердых частиц (частиц размером менее 2,5 мкм, PM_{2.5}) с использованием различных подходов. Связь между столбчатым AOD и PM_{2.5}

2.5)

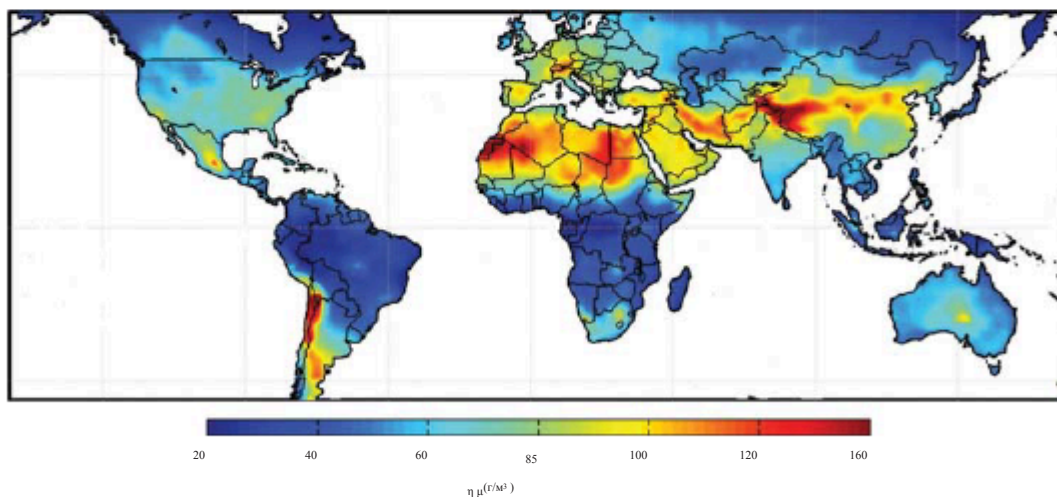
на него влияют

многие факторы (толщина аэрозольного слоя, высота масштаба, отсутствие облаков, состав, и метеорология), и, следовательно, добиться какой-либо прямой регрессии может быть трудно.

ван Донкелаар *et al.* (2010) использовали геохимическую модель, ограниченную спутниковыми наблюдениями столбчатого AOD и вертикального распределения, для установления глобального распределения коэффициентов пересчета. Эти факторы оказывают влияние на AOD - PM

2.5 взаимосвязь

и используются для преобразования столбчатого AOD в PM_{2.5} (Рис. 6.14). Глобальные горячие точки легко идентифицируются на рисунке 6.14 (например, промышленные зоны в Северной Америке и Европе, Индо-Гангский бассейн, пустыня Сахара, регионы сжигания биомассы в Южной Америке и Центральной Африке, источники пыли в Западной Азии и Восточном Китае), где ТЧ_{2.5} концентрация превышает самый большой порог (35 мкгм⁻³) Всемирной организации здравоохранения. Подробное сравнение с *in situ* наблюдениями показали, что эти значения на самом деле занижены. Они *et al.* (2012), основанный на анализе по Индийскому субконтиненту и применяющий коэффициент конверсии ван Донкелаара *et al.* (2010) в отношении MISR-AOD пришли к выводу, что недооценка



Глобальный обзор ТЧ, полученных со спутника_{2.5} **Рисунок** над сушей за период 2001-2006 гг. . (2010).

6.14 Воспроизведено с работы ван Донкелаара *et al.* Авторское право © 2010. Это в открытом доступе Статья. Цветную версию смотрите в разделе "Табличка".

показывает линейную корреляцию с совпадающими данными *in situ* данные, которые допустили смещение MISR-PM_{2.5} подлежит исправлению. Коррекция смещения увеличивает корреляцию между данными со спутника и *in situ* PM

от 0,73 до 0,98 (В день *et al.*, 2012). Такие подходы открывают новые возможности. изучить распределение PM_{2.5} в более крупном пространственном масштабе.

Хофф и Кристофер (2009) представили превосходный обзор нынешнего состояния спутниковых подходов к ТЧ_{2.5} оценка и будущих требований. Пространственно неоднородная взаимосвязь между AOD и PM_{2.5}

требует более тщательный анализ в региональном масштабе. Расхождение между абсолютными значениями AOD, полученными от различных датчиков, является еще одним источником неопределенности. Спутниковые оценки смещены в сторону условий ясного неба, поскольку обнаружение аэрозолей невозможно с помощью пассивного дистанционного зондирования в условиях облачного неба. Пассивные датчики на борту спутников на полярной орбите предоставляют прерывистые данные (максимум один раз в день, поскольку AOD не извлекается из ночных измерений), что серьезно ограничивает их применимость для оценки воздействия на здоровье. Геостационарные спутники могут обеспечить кон- непрерывные данные в нужные временные частоты, но ограниченных спектральных измерений может привести к большей неопределенности, чем существующие операционные датчиков. В настоящее время только спутник GOES получает AOD с разрешением 4 км по горизонтали с интервалом в полчаса, но его гео- графический охват ограничен Соединенными Штатами (Zhang *et al.*, 2011). Ошибки в поиске AOD распространяются на точность расчетных значений PM

таким образом, требуется улучшенный AOD, особенно в местах, где преобладают аэрозоли смешанного типа. Разрыв в отборе проб в облачных условиях - еще одна проблема, которую можно решить с помощью активного дистанционного зондирования и поляриметрического метода пассивного дистанционного зондирования (Кассианов *et al.*, 2011).

6.4 Краткое изложение и будущие требования

В этой главе мы кратко охарактеризовали качество существующих наземных и спутниковых аэрозольных продуктов и их применимость для изучения воздействия аэрозолей на климат и здоровье. Растущий спрос на новые информационные продукты с глобальным охватом для таких приложений в последние годы вывел методы дистанционного зондирования на новый уровень. Были разработаны датчики нового поколения, внедрены новые методы (например, многоугольные и мультиспектральные виды), а алгоритмы поиска были изменены на основе предыдущего опыта и требований сообщества пользователей. Эти усилия привели к значительному улучшению нашего понимания характеристик аэрозоля и обратных связей между аэрозолем и климатом. Улучшенные оценки климатических моделей стали возможными благодаря наличию данных об аэрозолях в более высоких пространственных и временных масштабах. Спутники ликвидировали пробел в данных в развивающихся странах и помогли выявить ранее неизвестные региональные горячие точки.

Учитывая такие перспективы, возрос спрос на дальнейшее улучшение качества данных. Будущие миссии должны планироваться таким образом, чтобы эти требования могли быть выполнены. Поиск аэрозоля требуется с высоким уровнем разрешения (более одного раза в день) и пространственным (≈ 100 м) разрешением, чтобы лучше количественно оценить искусственное усиление AOD вблизи облаков. В настоящее время эти микрофизические свойства могут быть использованы качественным образом с целью выявления основных аэрозольных воздушных масс. Качество этих извлекаемых продуктов должно быть улучшено путем обновления существующего LUT дополнительными моделями аэрозолей. Правильно спланированные кампании подачи заявок могут помочь в разработке соответствующих моделей аэрозолей, которые могут уменьшить несоответствие в мультисенсорной AOD. Унифицированный аэрозольный продукт (сочетающий сильные стороны

различные датчики) идеально подошли бы для научных приложений. Одновременное получение данных о свойствах аэрозоля и облаков в пределах одного пикселя еще больше снизит неопределенность при оценке взаимодействия аэрозоля и облака. Концентрация аэрозоля на поверхности (например, $TC_{2.5}$ и мат для твердых частиц-тер других размерных категорий) следует включать в обычные аэрозольные продукты для облегчения оценки воздействия на здоровье.

Благодарности

Авторы благодарны различным журналам за разрешение использовать опубликованные материалы для этой главы. Отмечаются усилия PI и сотрудников сайтов AERONET, использованные в этом исследовании. SNT признает финансовую поддержку проекта "Изменение круговорота воды", совместно осуществляемого МЧС Индии и НКРЭ Великобритании. SD подтверждает исследовательские гранты от DST, правительства Индии, по контракту SR / FTP / ES- 191/2010 и DST / CCP / PR/11 / 2011 в рамках исследовательских проектов, осуществляемых в ИТ Дели (ITD / IRD / RP02509 и ITD / IRD / RP2580).

Список литературы

- Абди Вишкай, Ф., Фламант, К., Куэста, Дж. *et al.* (2012) пыль транспорта над Ираком и Северной-запад Ирана, связанные с зимним Шамал: тематическое исследование. *Журнал геофизических исследований*, **117**, D03201.
- Аккерман С., Страбала К., Менцель В. *et al.* (1998) Как отличить чистое небо от облаков совместно с MODIS. *Журнал геофизических исследований*, **103**(D24), 32141- 32157.
- Аккерман, А.С., Тун, О.Б., Стивенс, Д.Э.Н. *et al.* (2000) Уменьшение тропической облачности из-за сажи. *Наука*, **288**, 1042- 1047.
- Альбрехт Б.А. (1989) Аэрозоли, микрофизика облаков и фракционная облачность. *Наука*, **245**, 1227 - 1230.
- Андреа, М.О. и Розенфельд, Д. (2008) Взаимодействие аэрозоля, облака и осадков. Часть 1. Природа и источники активных в облаках аэрозолей. *Обзоры наук о Земле*, **89**, 13 -41.
- Арола, А., Шустер, Г., Майре, Г. *et al.* (2011) Вывод содержания поглощающего органического углерода из данных AERONET. *Химия и физика атмосферы*, **11**, 215 - 225.
- Беллуэн, Б., Буше, О., Хейвуд, Дж. и Редди, М.С. (2005) Глобальные оценки аэрозоля прямое радиационное воздействие на основе спутниковых измерений. *Природа*, **438**, 1138-1140.
- Буше О. и Фам М. (2002) История радиационных воздействий сульфатного аэрозоля. *Геофизические Исследовательские письма*, **29**, (9), 1308. doi: 10.1029/2001GL014048.
- Брауэр, М., Амман, М., Бернетт, Р.Т. *et al.* (2012) Оценка воздействия для оценки глобальное бремя болезней, обусловленных загрязнением наружного воздуха. *Наука об окружающей среде и технология*, **46**(2), 652-660. Брав, У.Дж. (1929) Аэрозоли - облака, пыль, туман и дым. *Журнал химического образования*, **6**(9), 1497 -1502.
- Cabello, M., Orza, J.A.G., Barrero, M.A. *et al.* (2012) Пространственные и временные вариации воздействие экстремального пылевого явления в Сахаре. *Журнал геофизических исследований*, **117**, D11204.
- Кэмпбелл Дж.Р., Такетт Дж.Л., Рид Дж.С. *et al.* (2012) Оценка ночного CALIOP Определение оптической глубины аэрозоля 0,532 мкм и коэффициента поглощения. *Методы измерения атмосферного*, **5**, 2143-2160.

- Чанд, Д., Вуд, Р., Андерсон, Т.Л. *et al.* (2009) Прямое излучение, полученное со спутников. воздействие аэрозолей зависит от облачности. *Природа Наук О Земле*, 2, 181 - 184.
- Произведенного промышленным, Р. Дж. и Пилат, М. Я. (1969) климат: влияние аэрозолей. *Журнал прикладной Метеорология*, 8, 1001-1002.
- Чарльсон, Р.Дж., Шварц, С. Э., Хейлз, Дж.Х. *et al.* (1992) Антропогенное воздействие на климат аэрозоли. *Наука*, 255, 423 -430.
- Чен Ю., Лю К., Гэн Ф. *et al.* (2012) Вертикальное распределение оптических и микрофизических свойства атмосферных аэрозолей в периоды сухой дымки в Шанхае. *Атмосферная среда*, 50, 50-59.
- Чоу Дж.К. и Уотсон Дж.Г. (2007) Обзор методов измерения и составов для ультрадисперсных частиц. *Исследование качества аэрозоля и воздуха*, 7(2), 121 - 173.
- Кристофер, С.А., Чжан, Дж., Куафман, Ю.Дж. и Ремер, Л.А. (2006) Спутниковая оценка- влияние радиационного воздействия антропогенного аэрозоля на верхние слои атмосферы над безоблачными океанами. *Письма о геофизических исследованиях*, 33, L15816. Чанг, К.Э.Н., Раманатан, В., Кармайкл, Г. *et al.* (2010) Антропогенное аэрозольное излучение- тивное воздействие в Азии, полученное на основе региональных моделей с использованием данных об атмосфере и аэрозолях ассимиляция. *Химия и физика атмосферы*, 10, 6007-6024. Чанг, К.Э., Раманатан, В. и Декремер, Д. (2012) Оценки, ограниченные наблюдениями- радиационное воздействие углеродсодержащих аэрозолей. *Труды Национальной академии наук*, 109(29), 11624- 11629. Чанг, К.Э., Раманатан, В., Ким, Д. и Подгорный, И.А. (2005) Глобальный антропогенный прямое воздействие аэрозоля, полученное на основе спутниковых и наземных наблюдений. *Журнал геофизических исследований*, 110, D24207. Чилек, П., Дубей, М.К., Ломанн, У. *et al.* (2006) Косвенное воздействие аэрозоля над Индийским океаном. *Письма о геофизических исследованиях*, 33, L06806.
- Чилек, П. и Вонг, Дж. (1995) Влияние поглощающего аэрозоля на глобальный радиационный баланс. *Письма о геофизических исследованиях*, 22, 929-931.
- Купер, М.Дж., Мартин, Р.В., ван Донкелаар, А. *et al.* (2012) Спутниковый анализ множества загрязняющих веществ индекс глобального качества воздуха. *Наука и технология в области охраны окружающей среды* 46 (12), 8523 - 8524.
- Костантино, Л. и Бреон, Ф. М. (2010) анализ аэрозольное облако взаимодействия от мульти- сенсорные спутниковых наблюдений. *Геофизические Исследования Письма*, 37, L11801.
- Дей С. и Ди Джироламо Л. (2010) Климатология аэрозольных оптических и микрофизических свойства над Индийским субконтинентом по данным спектрорадиометра с многоугольным отображением за 9 лет (2000-2008). *Журнал геофизических исследований*, 115, D15204. Дей с. и Ди Джироламо, Л. (2011) десять лет изменения в свойства аэрозоля над Индостан. *Геофизические Исследования*, 38, L14811.
- Дей С., Ди Джироламо Л., ван Донкелаар А. *et al.* (2012) Изменчивость температуры наружного воздуха-)_{2,5}концентрация на Индийском субконтиненте: подход дистанционного зондирования. *тисulate (PM) Дистанционное зондирование окружающей среды*, 127, 153-161.
- Дей С., Ди Джироламо Л., Чжао Г. *et al.* (2011) Наблюдаемые со спутников взаимосвязи между свойства аэрозольных и пассатно-кучевых облаков над Индийским океаном. *Письма о геофизических исследованиях*, 38, L01804. Дей С., Трипати С.Н. и Мишра С.К. (2008) Вероятное состояние смешивания аэрозолей в Индо-Гангский Басуб, Северная Индия. *Письма о геофизических исследованиях*, 35, L03808.

- Дей С., Трипати С.Н., Сингх Р.П. и Холбен Б.Н. (2004) Влияние пыльных бурь на оптические свойства аэрозоля над Индо-Гангским бассейном. *Журнал геофизических исследований*, **109**, D20122. Дей С., Трипати С.Н., Сингх Р.П. и Холбен Б.Н. (2006) Извлечение черного углерода и удельное поглощение над городом Канпур, Северная Индия, в 2001-2003 годах. *Атмосферное окружение*, **40**(3), 445-456. Дайнер, Д.Дж., Бекерт, Дж.К., Рейли, Т.Х. *et al.* (1998) Спецификация многоуглового изображения-Описание прибора troRadiometer (MISR) и обзор экспериментов. *IEEE Труды по геонауке и дистанционному зондированию*, **36**, 1072- 1087. Ди Пьерро М., Джегле Л. и Андерсон Т.Л. (2011) Спутниковые наблюдения аэрозоля перенос аэрозоля из Восточной Азии в Арктику: три тематических исследования. *Химия атмосферы и физика*, **11**, 2225-2243. ван Донкелаар, А., Мартин, Р.В., Брауэр, М. *et al.* (2010) Глобальные оценки загрязнения окружающей среды концентрации твердых частиц по данным спутниковой аэрозольной оптики: разработка и применение. *Перспективы охраны окружающей среды.*, **118**(6), 847-855. Дубовик О., Холбен Б.Н., Экк Т.Ф. *et al.* (2002) Изменчивость поглощения и оптического свойства основных типов аэрозолей, наблюдаемых в различных точках земного шара. *Журнал атмосферных наук*, **59**, 590 - 608. Дубовик О. и Кинг М.Д. (2000) Гибкий инверсионный алгоритм для определения аэрозоля свойства на основе измерений яркости солнца и неба. *Журнал геофизических исследований*, **105**, 20673-20696. Дубовик О., Смирнов А., Холбен Б.Н. *et al.* (2000) Оценки точности аэрозоля оптические свойства, полученные с помощью аэрозольной роботизированной сети (AERONET) "Солнце и небо" измерения яркости. *Журнал геофизических исследований: Атмосферы.*, **105**(D8), 9791- 9806. Дуонг Х.Т., Сорошиан А. и Файнгольд Г. (2011) Исследуют потенциальные искажения в наблюдаемые и смоделированные показатели взаимодействия аэрозоля, облака и осадков. *Химия и физика атмосферы*, **11**, 4027 - 4037. Экк Т.Ф., Холбен Б.Н., Синюк А. *et al.* (2010) Климатологические аспекты оптического свойства аэрозольных смесей мелкодисперсного/грубодисперсного режима. *Журнал геофизических исследований*, **115**, D19205. Элиас Т. и Ружан Дж.Л. (2008) Оценка радиационного воздействия аэрозоля на землю уровень, над сушей и в безоблачной атмосфере, по данным наблюдения METEOSAT-7: метод и тематическое исследование. *Химия и физика атмосферы*, **8**, 625 - 636. Геогджаев И.В., Мищенко М.И., Лю Л. и Ремер Л. (2004) Глобальный двухканальный Аэрозольная климатология AVHRR: эффекты стратосферных аэрозолей и предварительные сравнения с данными MODIS и MISR. *Журнал количественной спектроскопии и переноса излучения. Журнал количественной спектроскопии и*, **88**, 47-59. Геогджаев И.В., Мищенко М.И., Россоу В.Б. *et al.* (2002) Глобальный двухканальный Данные AVHRR о свойствах аэрозоля над океаном за период наблюдений NOAA-9 и предварительные данные с использованием данных NOAA-7 и NOAA-11. *Журнал атмосферных наук*, **59**, 262-278. Геогджаев И.В., Мищенко М.И., Терез Е.И. *et al.* (2005) регионального очень расширенный высокое разрешение радиометра-производные климатология аэрозольной оптической толщины и размера. *Журнал геофизических исследований*, **110**, D23205.

- Джайлс, Д.М.Н., Холбен, Б.Н., Эк, Т.Ф. *et al.* (2012) Анализ аэрозоля AERONET свойства поглощения и классификации, характерные для регионов-источников аэрозоля. *Журнал-завершение геофизических исследований*, **117**, D17203. Глисон Дж.Ф., Хсу, Северная Каролина и Торрес О. (1998) Дым от сжигания биомассы, измеренный с использованием рассеянного ультрафиолетового излучения: шрам-В и бразильский дым между Южно-Африканской Республикой и Мозамбиком. *Журнал геофизических исследований*, **103**, 31969-31978.
- Я., Коренев, И. и эк, Т. Ф. (2007) классификация аэрозолей опора-оценки получены на основе данных AERONET о прямых солнечных лучах. *Химия и физика атмосферы*, **7**, 453-458.
- Григс М. (1975) Измерения оптической толщины атмосферного аэрозоля над водой с использованием Данных ERTS-1. *Вестник Ассоциации по контролю над загрязнением воздуха*, **25**, 622 - 626.
- Gryspeerdt, E. и Штир, П. режимом основе (2012) аэрозольное облако взаимодействий. *Геодезическая Исследование Письма*, **39**(21).
- Гупта П., Кристофер С.А., Ванг Дж. *et al.* (2006) Дистанционное зондирование твердых частиц с помощью спутников вещества и качество воздуха над городами мира. *Атмосферная среда*, **40**, 5880 - 5892.
- Хансен Дж., Сато М. и Руди, Р. (1997) Радиационное воздействие и реакция климата. *Журнал Геофизических исследований*, **102**, 6831 -6864.
- Хао, У.М. и Лю, М.Х. (1994) Пространственное и временное распределение тропической биомассы сжигание. *Глобальные биогеохимические циклы*, **8**, 495 - 503.
- Хейвуд Дж. и Буше О. (2000) Оценки прямого и косвенного радиационного воздействия из-за тропосферных аэрозолей: обзор. *Обзоры геофизики*, **38**(4), 513 -543.
- Герман, Дж.Р. и Селарье, Э.А. (1997) Климатология отражательной способности земной поверхности в 340-380 нм по данным TOMS. *Журнал геофизических исследований*, **102**, 28003-28012.
- Хофф Р.М. и Кристофер С. (2009) Дистанционное зондирование загрязнения твердыми частицами из космоса: достигли ли мы земли обетованной? *Журнал Ассоциации по обращению с воздухом и отходами*, **59**, 645 - 675. Холбен Б.Н., Экк Т.Ф., Слущер И. *et al.* (1998) AERONET - объединенная приборная сеть- работа и архив данных для определения характеристик аэрозолей. *Дистанционное зондирование окружающей среды*, **66**, 1-16.
- Холбен Б.Н., Танре Д., Смирнов А. *et al* (2001) Появляющийся аэрозоль наземного базирования климатология: оптическая глубина аэрозоля от AERONET. *Журнал геофизических исследований*, **106**, 12067 - 12097.
- МГЭИК (2007) Изменения компонентов атмосферы и радиационного воздействия в *Климате Изменение 2007: основы физической науки, вклад Рабочей группы I в Четвертый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата* (ред. С. Соломон, Д. Кин, М. Мэннинг *et al.*), издательство Кембриджского университета.
- Джонсон Б.Т., Шайн К.П. и Форстер П.М. (2004) Полупрямой аэрозольный эффект: воздействие о поглощении аэрозолей морским кучевым слоем. *Ежеквартальный журнал Королевского метеорологического общества*, **130**, 1407 - 1422.
- Джонс, Т.А. и Кристофер, С.А. (2010) Статистические свойства аэрозоля и облака- взаимодействие осадков в Южной Америке. *Химия и физика атмосферы*, **10**, 2287 -2305.
- Джонс Т.А., Кристофер С. и Куаас Дж. (2009) Шестилетняя спутниковая оценка региональные различия в косвенных эффектах аэрозоля. *Химия и физика атмосферы*, **9**, 4091-4114.

- Кан, Р.А., Чен, Ю., Нельсон, Д.Л. *et al.* (2008) Высоты выброса дыма от лесных пожаров: два взгляда из космоса. *Письма о геофизических исследованиях*, **35**, L04809.
- Кан, Р.А., Гейтли, Б.Дж., Гарай, М.Дж. *et al.* (2010) Спектрорадиомногоугольной визуализации-глобальная оценка аэрозольной продукции путем сравнения с аэрозольной роботизированной сетью. *Журнал геофизических исследований*, **115**, D23209. Кан Р.А., Гейтли Б., Мартончик Дж. *et al.* (2005) Глобальная оптическая глубина аэрозоля MISR проверка основана на двухлетних совпадающих наблюдениях AERONET. *Журнал геофизических исследований*, **110**, D10S04. Кан Р.А., Гарай М.Дж., Нельсон Д.Л. *et al.* (2011) Ответ на "Навстречу объединенному спутнику климатология свойств аэрозоля: 3. MODIS против MISR против AERONET". *Журнал количественной спектроскопии и переноса излучения*, **112**, 901-909. Кан, Р.А., Ли, В.Х., Морони, К. *et al.* (2007) Физические характеристики шлейфа аэрозольного источника-характеристики, полученные с помощью *Журнал геофизических исследований*, **112**, D11205. Кан Р.А., Нельсон Д.Л., Гарай М. *et al.* (2009) Характеристики аэрозольных продуктов MISR и статистические сравнения с MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **47**(12), 4095-4114. Калашникова О.В. и Кан Р.А. (2008) Эволюция шлейфа минеральной пыли над Атлантикой из комбинированных результатов аэрозольных исследований MISR / MODIS. *Журнал геофизических исследований*, **113**, D24204. doi: 10.1029/2008JD010083. Калашникова О.В., Кан Р., Соколик И.Н. и Ли В.Х. (2005) Способность многоугольного наблюдения с помощью дистанционного зондирования для выявления и различения типов минеральной пыли: оптические модели els и получение оптически толстых шлейфов. *Журнал геофизических исследований: Atmospheres*, **110**(D18). Каскаутис, Д.Г., Калапуредди, М.К.Р., Мурти, К.К. *et al.* (2010) Неоднородность в пре-типы муссонных аэрозолей над Аравийским морем определены на основе корабельных измерений спектральных AOD. *Химия и физика атмосферы*, **10**, 4893-4908. Кассианов Е., Овчинников М., Берг Л.К. и Флинн С. (2011) Извлечение аэрозолей при переменная облачность: проблемы и перспективы, в разделе *Поляриметрическое обнаружение, характеристика и дистанционное зондирование* (ред. М.И. Мищенко, Ю.С. Яцкив, В.К. Розенбуш и Г. Видеен), Спрингер, Дордрехт, стр. 205-232. Кауфман, Ю.Дж. (2006) Спутниковые наблюдения за воздействием природных и антропогенных аэрозолей об облаках и климате. *Обзоры космической науки*, **125**, 139-147. Кауфман, Ю.Дж., Корен, И., Ремер, Л.А. *et al.* (2005) Влияние дыма, пыли и загрязняющих веществ-аэрозоль на образование мелких облаков над Атлантическим океаном. *Труды Национальной академии наук*, **102**(32), 11207-11212. Кауфман Ю.Дж., Танре Д. и Буше О. (2000) Спутниковый обзор аэрозолей в климатической системе. *Природа*, **419**, 215-223. Кауфман, Ю.Дж., Вальд, А., Ремер, Л. *et al.* (1997) Канал MODIS 2.1 мкм - корреляция с видимым коэффициентом отражения для использования при дистанционном зондировании аэрозоля. *IEEE Transactions on Geo- наука и дистанционное зондирование*, **35**(5), 1286-1298. Кедия С. и Рамачандран С. (2009) Изменчивость оптических и физических характеристик аэрозоля-теристика Бенгальского залива и Аравийского моря, полученная на основе показателей Ангстрема. *Журнал геофизических исследований*, **114**, D14207.

- Кишча П., Старобинец Б., Калашникова О. и Альперт П. (2011) Оптическая толщина аэрозоля-тенденции роста численности населения на Индийском субконтиненте. *Международный журнал по дистанционному зондированию*, 32(24), 9137-9149. Коффи Б., Шульц М., Бреон Ф.М., Грисфеллер Дж., Винкер Д.М., Балкански Ю., Бауэр С., Бернтсен, Т., Чин, М., Коллинз, У.Д., Дентенер, Ф., Диль, Т., Истер, Р. К., Ган, С.Дж., Гину, П.А., Гон, С., Горовиц, Л.В., Иверсен, Т., Киркеваг, А., Кох, Д.М., Крол, М., Майре, Г., Стер, П., и Такемура Т. (2012) Применение продукта CALIOP layer для оценки вертикального распределения аэрозолей, рассчитанного с помощью глобальных моделей: часть 1. Результаты этапа I AeroCom, *Журнал геофизических исследований*, 117, D10201.
- Корен И., Алтарац О., Ремер Л.А. *et al.* (2012) Усиление дождя, вызванное аэрозолем от тропиков до средних широт. *Наука о природе и Геофизика*, 118-122.
- Корен И., Файнгольд Г. и Ремер Л.А. (2010) Усиление глубоких конвективных облаков над Атлантикой: аэрозольный эффект, метеорология или артефакт поиска? *Химия и физика атмосферы*, 10, 8855-8872. Корен И., Кауфман Ю.Дж., Ремер Л.А. и Мартинс Дж.В. (2004) Измерение эффекта влияния амазонского дыма на подавление образования облаков. *Наука*, 303, 1342 - 1345.
- Корен И., Кауфман Ю.Дж., Розенфельд Д., Ремер Л.А. и Рудич Ю. (2005) Аэрозольная инвагинация-образование и реструктуризация атлантических конвективных облаков, *Письма о геофизических исследованиях*, 32, L14828.
- Корен И., Мартинс Дж.В., Ремер Л.А. и Афарган Х. (2008) Усиление дыма в сравнении с торможением облаков над Амазонкой. *Наука*, 321(5891), 946 - 949.
- Корен И., Ремер Л.А., Кауфман Ю.Дж. *et al.* (2007) О сумеречной зоне между облаками и аэрозоли. *Письма о геофизических исследованиях*, 34, L08805.
- Ковен, К. Д. и Фунг, И. (2006) Вывод состава пыли из зависимости от длины волны. данные о поглощении в аэрозольной роботизированной сети (AERONET). *Журнал геофизических исследований: Атмосферы*, 111 (D14), D14205. Кумари Б.П., Лондхе А.Л., Дэниел С. и Джадхав Д.Б. (2007) Наблюдательные свидетельства затемнения солнечной системы: компенсирует потепление поверхности над Индией. *Письма о геофизических исследованиях*, 34, L21810.
- Ли Дж., Ким Дж., Сон К.Х. *et al.* (2010) Характеристики типов аэрозолей от AERONET измерения солнечным фотометром. *Атмосферная среда*, 44, 3110 -3117.
- Ли, К.Х., Ли, З., Ким, Дж. и Коханоски, А. (2009) Мониторинг атмосферного аэрозоля по данным спутниковых наблюдений: история трех десятилетий, в *Атмосферный и биологический мониторинг окружающей среды*, (ред. Ю.Дж. Ким, У. Платт, М.Б. Гу и Х. Ивахаси), Спрингер, стр. 13-38. Лелевельд Дж., Беррешайм Х., Борманн С. *et al.* (2002) Глобальный перекресток проблем загрязнения воздуха над Средиземноморьем. *Наука*, 298, 794 -799.
- Леви, Р. К., Лептух, Г.Г., Кан, Р. *et al.* (2009) Критический взгляд на ежемесячные данные оптическая глубина аэрозоля по спутниковым данным. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47 (8), 2942-2956. Леви, Р. К., Ремер, Л.А. и Дубовик, О. (2007) Глобальные оптические свойства аэрозолей и применение спектрорадиометра для получения изображений с умеренным разрешением для сбора аэрозолей на суше. *Журнал геофизических исследований*, 112, D13210.
- Леви, Р. К., Ремер, Л.А., Клейдман, Р.Г. *et al.* (2010) Глобальная оценка коллекции 5 Аэрозольных продуктов MODIS в темных целях над сушей. *Химия и физика атмосферы*, 10, 10399-10420.

- Ли, З., Ли, К.Х., Ван, Й. *et al.* (2010) Первые оценки безоблачности, основанные на наблюдениях радиационное воздействие аэрозолей на территории Китая. *Журнал геофизических исследований*, **115**, D00K18. Ли, З., Чжао, Х., Кан, Р. *et al.* (2009) Неопределенности в спутниковом дистанционном зондировании аэрозолей и влияние на мониторинг его долгосрочных тенденций: обзор и перспективы. *Анналы геофизики*, **27**, 2755 - 2770.
- Лю, Д.З., Liu, Z., Winker, D. и Trepte, C. (2008) Глобальный обзор пыли с разрешением по высоте аэрозоли за первый год лидарных измерений CALIPSO. *Журнал геофизических исследований*, **113**, D16214. Лю Л. и Мищенко М.И. (2008) На пути к единой спутниковой климатологии свойств аэрозолей- свойства: прямые сравнения аэрозольных продуктов продвинутого уровня 2. *Журнал количественной спектроскопии и переноса излучения*, **109**(14), 2376- 2385. Лю, Ю., Ван, З., Ван, Дж. *et al.* (2011a) Влияние вертикальных профилей аэрозолей на спутник- оцененные концентрации сульфатов частиц на поверхности. *Дистанционное зондирование окружающей среды*, **115**, 508-513.
- Лю Дж., Чжэн Ю., Ли З. *et al.* (2011b) Транспорт, вертикальная конструкция и радиационная опора- масштабы пылевых явлений на Юго-востоке Китая определены с помощью наземных и космических датчиков. *Атмосферная среда*, **45**, 6469-6480.
- Леб, Н.Г. и Шустер, Г.Л. (2008) Наблюдательное исследование взаимосвязи между облачностью, аэрозолем и метеорологией в условиях нарушенной облачности низкого уровня. *Журнал геофизических исследований: Атмосферы*, **113**(D14).
- Ломани У. и Фейхтер Дж. (2005) Глобальное не прямое воздействие аэрозоля: обзор. *Атмосферный Химия и физика*, **5**, 715- 737.
- Ломани У., Корен И. и Куафман Ю.Дж. (2006) Раскрывают роль микрофизических и динамические эффекты при определении свойств облаков над Атлантикой. *Письма о геофизических исследованиях*, **33**, L09802. Маховальд, Н.М. и Дюфрейн, Дж.Л. (2004) Чувствительность аэрозольного индекса TOMS к связанной- высота аэрозольного слоя: значение для обнаружения источников минерального аэрозоля. *Письма о геофизических исследованиях*, **31**, L03103. Марей, Х.С., Гилле, Дж.К., Эль-Аскари, Х.М. *et al.* (2011) Аэрозольная климатология над дельтой Нила основано на спутниковых данных *Химия и физика атмосферы*, **11**, 10637 - 10648.
- Маршак А., Вен Г., Коукли Дж.А. Младший., *et al.* (2008) Простая модель для облачного аджа- эффект плотности и видимое посинение аэрозолей вблизи облаков. *Журнал геофизических исследований*, **113**, D14S17. Мэсси С.Т., Торрес О. и Смит С.Дж. (2004) Спектрометр для картирования общего содержания озона (TOMS) наблюдения за увеличением концентрации аэрозоля в Азии зимой с 1979 по 2000 год. *Журнал геофизических исследований*, **109**, D18211. Макпетерс, Р.Д., Холландсворт, С.М., Флинн, Л.Э. *et al.* (1996) Долгосрочные тенденции изменения содержания озона получено на основе 16-летнего объединенного отчета Nimbus 7 / Meteor 3 TOMS Версии 7. *Письма о геофизических исследованиях*, **25**, 3699-3702.
- Мищенко М.И., Геогджаев И.А., Кэрнс Б. *et al.* (2007a) Прошлое, настоящее и будущее глобальная аэрозольная климатология, полученная на основе спутниковых наблюдений: перспектива. *Журнал количественной спектроскопии и переноса излучения*, **106**, 325-347.
- Мищенко М.И., Геогджаев И.А., Россоу В.Б. *et al.* (2007b) Долгосрочный спутник запись показывает вероятную недавнюю тенденцию к образованию аэрозолей. *Наука*, **315**(5818), 1543.

- Мищенко М.И., Геогджаев И.В., Кэрнс Б. *et al.* (1999) Извлечение аэрозоля из океан с использованием данных AVHRR каналов 1 и 2: анализ чувствительности и предварительные результаты. *Прикладная оптика*, **38**, 7325-7341. Мищенко М.И., Геогджаев И.В., Лю Л. *et al.* (2009) На пути к единому спутниковому климату-тоология свойств аэрозоля: что нам говорят полностью совместимые аэрозольные данные MODIS и MISR? *Излучения*, **110**, 402-408.
- Лю Л., Геогджаев И.В., *et al.* (2012) Аэрозольные извлечения из излучения AVHRR в каналах 1 и -2: обновленные и пересмотренные долгосрочные тенденции, *Журнал количественной спектроскопии и переноса излучения*, **113**, 1974-1980, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2012.05.006> (дата обращения 13 июля 2013 г.).
- Мишра А. К. и Шибата Т. (2012) Климатологические аспекты сезонных колебаний аэрозоля вертикальное распределение по центральному Индо-Гангскому поясу (IGB), полученное с помощью космического лидара CALIOP. *Атмосферная среда*, **46**, 365- 375. Мишра С.К. и Трипати С.Н. (2008) Моделирование оптических свойств минеральной пыли над Индийской пустыней. *Журнал геофизических исследований*, **113**, D23201.
- Мишра С.К., Трипати С.Н., Аггарвал С.Г. и Арола А. (2012) Оптические свойства режим накопления загрязненной минеральной пыли: влияние формы частиц, содержания гематита и полувнушенное смешивание с углеродсодержащими частицами. Мисра, *Теллус*, **64B**, 18536.
- А., Трипати, С.Н., Каул, Д.С. и Уэлтон, Э.Дж. (2012) Исследование MPLNET-производных аэрозольная климатология над Канпуром, Индия, и валидация CALIPSO level 2 версии 3 продукты обратного рассеяния и гашения. *Журнал атмосферных и океанических технологий*, **29**, 1285- 1294.
- Мурти К.К., Бабу С.С. и Сатиш С.К. (2007) Временная неоднородность в аэрозоле характеристики и результирующее радиационное воздействие на прибрежной станции в тропиках - Часть 1. микрофизические и оптические свойства. *Анналы геофизики*, **25**, 2293-2308. Майр, Г., Стордал, Ф., Джонсруд, М. *et al.* (2004) Взаимное сравнение полученных спутниковых данных оптическая глубина аэрозоля над океаном. *Журнал атмосферных наук*, **61**, 499-513.
- Майр, Г., Стордал, Ф., Джонсруд, М. *et al.* (2005) Сопоставление данных, полученных со спутников. Оптическая глубина аэрозоля над океаном в период с сентября 1997 по декабрь 2000 года. *Химия и физика атмосферы*, **5**, 1697-1719. Просперо, Дж.М., Жино, П., Торрес, О. *et al.* (2002) Экологическая характеристика глобального источники атмосферной почвенной пыли идентифицированы с помощью спектрометра Nimbus 7 Total Ozone Mapping (TOMS), поглощающего аэрозольный продукт. *Обзоры по геофизике*, **40**(1). doi: 10.1029 /2000RG000095. Куаас Дж. и Буше О. (2005) Ограничение первого аэрозольного непрямого радиационного воздействия в GCM LMDZ используются спутниковые данные POLDER и MODIS. *Геофизические исследования Письма*, **32**, L17814.
- Куаас Дж., Буше О., Беллуин Н. и Кинн С. (2008) Спутниковая оценка прямого и косвенного воздействия аэрозолей на климат. *Журнал геофизических исследований*, **113**, D05204.
- Рамачандран С. и Чериан Р. (2008) Региональные и сезонные колебания аэрозоля оптические характеристики и их частотное распределение по Индии в 2001-2005 годах. *Журнал геофизических исследований*, **111**, D20207. Раманатан В., Крутцен П.Дж., Киль Дж.Л. и Розенфельд Д. (2001) Аэрозоли, климат и гидрологический цикл. *Наука*, **294**, 2119 -2124.

- Редеманн Дж., Чжан К., Рассел П. Б. *et al.* (2009) Тематические исследования дистанционного зондирования аэрозолей вблизи облаков. *Журнал геофизических исследований*, **114**, D06209.
- Ремер, Л.А., Кауфман, Ю.Дж., Танре, Д. *et al.* (2005) Аэрозольный алгоритм MODIS, произв.-
цтс и валидация. *Журнал атмосферных наук*, **62**, 947-972.
- Ремер, Л.А., Клейдман, Р.Г., Леви, Р. К. *et al.* (2008) Глобальная аэрозольная климатология по данным
спутниковых датчиков MODIS. *Журнал геофизических исследований*, **113**, D14S07.
- Шустер Г.Л., Дубовик О. и Холбен Б.Н. (2006) Показатель Ангстрема и бимодальный размер
распределения. *Журнал геофизических исследований*, **111**, D07207.
- Шустер Г.Л., Дубовик О., Холбен Б.Н. и Клоттио Э. Э. (2005) Вывод о черном цвете.
содержание углерода и удельное поглощение аэрозольной роботизированной
сетью (AERONET) при извлечении. *Журнал геофизических исследований*, **110**, D10S17.
- Холбен Б.Н., Слущкер И., *et al.* (2009) Морская аэрозольная сеть как совокупность-
концепция аэрозольной роботизированной сети, *Журнал геофизических исследований*, **114**, D06204.
- Сорошян А., Файнголд Г., Лебсок, доктор медицинских наук. *et al.* (2009) О восприимчивости к осадкам-
устойчивость облаков к аэрозольным возмущениям. *Письма о геофизических исследованиях*, **36**, L13803. Сорошян А.,
Файнголд Г., Лебсок, доктор медицинских наук. *et al.* (2010) Деконструкция конструкции восприимчивости к выпадению осадков-
: улучшение методологии для исследований осадков
из аэрозольных облаков. *Журнал геофизических исследований*, **115**, D17201.
- С.Н., Дей, С. *et al.* (2012) Определение типов аэрозолей по
Индо-Гангский бассейн по данным наземных солнечных фотометров. *Атмосферные
исследования*, **109**, 64-75.
- Стивенс Г.Л., Вейн Д.Г., Бозн Р.Дж. *et al.* (2002) Миссия CloudSat и A-
Train: новое измерение космических наблюдений за облаками и осадками. *Бюллетень
Американского метеорологического общества*, **83**, 1771-1790.
- Стивенс Б. и Файнгольд Г. (2009) Изучение воздействия аэрозоля на облака и осадки
в буферной системе. *Природа*, **461**, 607-613.
- Стоу, Л.Л., Якобович, Х., Оринг, Г. *et al.* (2002) Расширенный набор климатических данных Pathfinder Atmosphere (ПАТМОС) с очень высоким разрешением
первоначальный анализ и оценки. *Журнал климата*, **15**, 1243-1260. Су, У., Леб, Н.Г., Сюй, К.М.
et al. (2010) Оценка косвенного воздействия аэрозоля от
спутниковые измерения с одновременным метеорологическим анализом. *Журнал
геофизических исследований*, **115**, D18219. Такетт, Дж.Л. и Ди Джироламо,
Л. (2009) Усиленное обратное рассеяние аэрозоля вблизи тропических облаков
пассатные облака, обнаруженные спутниковым лидаром. *Письма о геофизических исследованиях*, **36**,
L14804.
- Торрес, О., Бхартия, П.К., Герман, Дж.Р. *et al.* (1998) Вывод свойств аэрозоля из
спутниковые измерения обратно рассеянного ультрафиолетового излучения: теоретические основы. *Журнал
геофизических исследований*, **103**, 17,099-17,110.
- Торрес О., Бхартия П.К., Герман Дж.Р. *et al.* (2002) Долгосрочный рекорд аэрозольного оптического
глубина по данным наблюдений TOMS и сравнения с измерениями AERONET. *Журнал
атмосферных наук*, **59**, 398-413.
- Трипати, С. Н., Pattnaik, А. Дэй С. (2007) аэрозоль косвенное влияние на индо-
Гангской равнине. *Атмосферной Среды*, **41**(33), 7037-7047.
- Туми, С. (1977) Влияние загрязнения на коротковолновое альbedo облаков. *Журнал
Наук об атмосфере*, **34**(7), 1149-1152.

- Вэл Мартин, М., Logan, Дж.А., Кан, Р. *et al.* (2010) Высота выброса дыма от пожаров в Северной Америка: анализ пятилетних спутниковых наблюдений. *Химия атмосферы и физика*, **10**, 1491-1510. Варнай Т. и Маршак А. (2009) Наблюдения MODIS за повышенной отражательной способностью ясного неба вблизи облаков. *Письма о геофизических исследованиях*, **36**, L06807.
- Уэлтон, Э.Дж. и Кэмпбелл, Дж. Р. (2002) Микроимпульсные лидарные сигналы: анализ неопределенности. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **19**, 2089-2094.
- Уэлтон, Э.Дж., Кэмпбелл, Дж.Р., Спинхирн, Дж.Д. и Скотт, В.С. (2001) Глобальный мониторинг облака и аэрозоли с использованием сети микроимпульсных лидарных систем. *Материалы SPIE*, **4153**, 151-158.
- Уэлтон, Э.Дж., Восс, К.Дж., Гордон, Х.Р. *et al.* (2000) Наземные лидарные измерения аэрозолей во время ACE-2: описание прибора, результаты и сравнения с другими наземными и воздушными измерениями. Уэлтон, Э.Дж., Теллус, **52B**, 636- 651.
- Восс, К.Дж., Куинн, П.К. *et al.* (2002) Измерения аэрозоля vertical profile файлы и оптические свойства во время INDOEX 1999 с использованием микроимпульсных лидаров. *Журнал геофизических исследований*, **107**(D19), 8019.
- Вен Г., Маршак А. и Кахалан Р. Ф. (2006) Влияние трехмерных облаков на чистое небо. коэффициент отражения и улавливание аэрозоля в районе сжигания биомассы в Бразилии. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **3**, 169-172.
- Уайлд М., Гильген Х., Рош А. *et al.* (2005) От затемнения к осветлению: десятилетний период изменения солнечной радиации на поверхности Земли. *Наука*, **308**(5723), 847 - 850.
- Ся, Х.Г., Ван, П., Ван, Ю., *et al.* (2008) Оптическая глубина аэрозоля над Тибетским плато и ее связь с аэрозолями над пустыней Такла-Макан, *Письма о геофизических исследованиях*, **35**(16), L16804.
- Ю, Х., Дикинсон, Р.Э., Чин, М., Кауфман, Ю.Дж., Чжоу, М., Чжоу, Л., Тянь, Ю., Дубовик, О. и Холбен Б.Н. (2004) Прямое радиационное воздействие аэрозолей, определенное на основе комбинации результатов поиска MODIS и моделирования GOCART, *Журнал геофизических исследований*, **109**, D03206. Ю, Х., Кауфман, Ю.Дж., Чин, М. *et al.* (2006) Обзор оценок, основанных на измерениях прямого радиационного воздействия и форсирования аэрозоля. *Химия и физика атмосферы*, **6**, 613- 666.
- Чжан Х., Ляпустин А., Ван Ю. *et al.* (2011) Оптическая глубина аэрозоля под разными углами обзора алгоритм поиска геостационарного спутника над Соединенными Штатами. *Химия и физика атмосферы*, **11**, 11977 - 11991.

Зарождение атмосферных частиц

Микко Сипиля, Катрианна Лехтипало и Маркку Кулмала
Физический факультет Хельсинкского университета, Финляндия

7.1 Общая значимость

Частицы атмосферного аэрозоля оказывают непосредственное влияние на радиационный баланс земли, рассеивая и поглощая солнечное излучение. Частицы аэрозоля также действуют как ядра конденсации для образования капель облаков. Поэтому, аэрозоль свойства могут косвенно влиять на земле ради- ации бюджета влияет на альbedo облаков (Туми, 1974), степени, осадков и жизнь- время (Розенфельд, 2000; Раманатан *et al*, 2001; Розенфельд *et al.*, 2008). На атмосферную аэрозольную систему оказывает влияние антропогенная деятельность, и общее отклонение радиационного баланса Земли (радиационное воздействие), вызванное воздействием человека, в аэрозольной системе на радиационное воздействие является отрицательным и, следовательно,, в настоящее время частично противодействует положительному воздействию $+2,64 \text{ Вт/м}^2$

(МГЭИК, 2007). Влияние изменений

(в 2005 году)

(МГЭИК, 2007) обусловлено главным образом выбросами парниковых газов. Значительная часть общего аэрозольного эффекта обусловлена эффектом альbedo облаков, которое в настоящее время оценивается в диапазоне от $-0,3$ до $-1,8 \text{ Вт/м}^2$ (в 2005 году) (МГЭИК, 2007) - образует крупнейший единый источник неопределенности в нашем понимании изменения климата. С другой стороны, наш уровень понимания многих других эффектов, включая эффект срока службы облака, очень низок (например, Penner *et al.*, 2006), что общепринятой оценки не существует. Понимание физических и химических процессов, влияющих на аэрозольную систему Земли и взаимодействие аэрозоля с облаками, необходимо для надлежащего включения аэрозолей в глобальные климатические модели.

Зарождение является основным этапом образования новых частиц из паров предшественника (Сайнфельд и Пандис, 2006; Кулмала, 2003) и, по определению, связано с энергетическим барьером. Во время гомогенной нуклеации из пересыщенных паров образуются небольшие кластеры в

газовая фаза в результате столкновений молекул пара. Зарождение происходит, когда частица или кластер преодолевает энергетический барьер и молекулярный поток на поверхность частицы превышает молекулярный поток с поверхности, так что кластер продолжает свой рост. Кластер, который находится на грани превращения в частицу (т. е. размер которого соответствует максимуму на диаграмме свободной энергии), называется критическим кластером. Зародышеобразование также может происходить на поверхности существующей частицы в процессе, называемом гетерогенным зародышеобразованием. Энергетический барьер для образования кластеров при гетерогенной нуклеации обычно ниже, чем для гомогенной нуклеации (см., например, Кулмала *et al.*, 2007а; Винклер *et al.*, 2008), и при наличии какой-либо поверхности обычно предпочтительнее гетерогенное образование зародышей. Ионно-индуцированная нуклеация представляет собой особую форму гетерогенной нуклеации. В этом случае фазовый переход происходит в молекулярном ионном кластере. Зародышеобразование может включать только одно вещество в газовой фазе, и в этом случае оно называется гомомолекулярным зародышеобразованием, или двумя (бинарное зародышеобразование), тремя (троичное зародышеобразование) или даже более частицами-предшественниками.

Зародышеобразование часто происходит в атмосфере Земли (Кулмала *et al.*, 2004).

Пример такого "события зарождения", измеренного на станции SMEAR II (Хари и Кулмала, 2005) в Хюйтияля, южная Финляндия (см. также Мякеля., 1997), показан на рисунке *et al*

7.1. Данные на рисунке были измерены с использованием стандартной системы дифференциального определения подвижности частиц (DMPS) (Aalto *et al.*, 2001). Здесь можно видеть, что непрерывная популяция так называемых частиц в режиме Эйткена (см., например, Hinds, 1999) в диапазоне размеров от нескольких нанометров до десятков нанометров, которая обычно наблюдается в атмосфере, в этот день была прервана. Это событие зарождения произошло в течение дня, что можно видеть по стрелкам на рисунке, указывающим на время 06:00 и 12:00. Излучением,

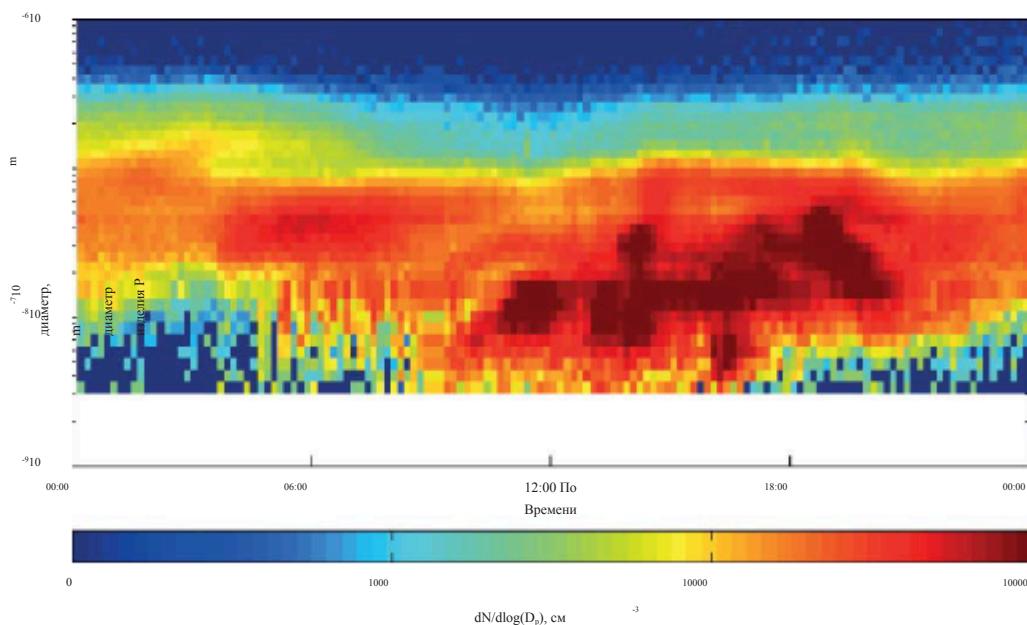


График поверхности за двадцать четыре часа, показывающий изменение размера частиц- Рисунок 7.1
распределение в день события зарождения на полевой лесной станции Хюйтияля МАЗОК II, Финляндия. Штриховкой показано количество частиц в канале (логарифмического) размера. Эти данные были получены с помощью обычной системы определения частиц с дифференциальной подвижностью (DMPS), поэтому никакой информации о концентрациях ниже 3 нм получить невозможно. Цветное исполнение смотрите в разделе на табличке.

в результате возникают конвективные потоки и перемешивание воздуха в пограничном слое. После перемешивания, незадолго до полудня, в канале наименьшего размера (3 нм) детектора появляются новообразованные частицы. Эти частицы растут со временем в результате конденсации и коагуляции. Выросшие частицы снова вносят свой вклад в популяцию частиц в режиме Эйткена на следующий день. Этот тип дневного события зарождения зародышей происходит в Хюйтияля примерно 60-120 раз в год (Кулмала *et al.*, 2010), причем частота достигает максимума весной и осенью. Примечательно, что сам процесс зародышеобразования не измеряется, но о существовании этого явления делается вывод по появлению частиц размером 3 нм. Эти частицы размером 3 нм весят несколько тысяч единиц атомной массы и, скорее всего, содержат десятки или сотни молекул. Эти частицы уже стабильны и растут за счет коагуляции и конденсации малолетучих материалов, включая, скорее всего, серную кислоту и окисленные органические соединения. Образование зародышей в атмосфере происходит при размерах, значительно меньших диаметра 3 нм, и сам процесс скрыт от прибора, измеряющего эволюцию распределения частиц по размерам.

Если быть точным, появление новых частиц не свидетельствует о существовании процесса образования ядер. Как упоминалось ранее, зарождение происходит, когда кластер или частица преодолевает максимум энергетического барьера и начинает свободно расти. Если такого барьера не существует - если система чрезвычайно сильно пересыщен относительно частиц прекурсора паров, для примера - нуклеации, по определению, не возникнет. В таких случаях, начиная с отдельных молекул, скорость образования кластеров с любым количеством молекул всегда выше, чем скорость разложения кластеров при испарении. С другой стороны, образование новых частиц также может включать в себя несколько локальных минимумов и максимумов в многомерном пространстве свободной энергии формирования. В таких случаях зарождение будет происходить несколько раз в течение роста одной частицы. На рисунке 7.2 схематично показаны возможные формы распределений свободной энергии образования для однокомпонентного (гомомолекулярного) случая. В реальной атмосфере гомомолекулярное зарождение, скорее всего, не происходит, но распределение энергии представляет собой многомерную величину. Несмотря на потенциальные проблемы с терминологией, 'нуклеации' часто используется как синоним для образования новых частиц. Размер частиц обычно определяется и обычно составляет от 1 до 3 нм в диаметре.

Несмотря на то, что образование новых частиц является глобальным явлением (Кулмала *et al.*, 2004), атмосферные механизмы зарождения зародышей до сих пор детально не изучены. В следующих разделах мы обсудим более подробно, как изучается атмосферная нуклеация - или образование новых растущих молекулярных кластеров - и как недавний прогресс в исследованиях нуклеации изменил наш взгляд на механизмы нуклеации в атмосфере и актуальность нуклеации для атмосферной и климатической системы Земли.



Рисунок 7.2 Схематические примеры возможных форм свободной энергии образования в зависимости от количества молекул в кластере. Смотрите текст для получения более подробной информации.

7.2 Обнаружение атмосферных наночастиц

Для получения полной картины

состава атмосферного аэрозоля необходимы различные методы измерения. Наиболее важными свойствами аэрозольных частиц являются их распределение по размерам, концентрация и химический состав. Чтобы понять, что такое образование частиц, эти и другие параметры, такие как скорость образования и роста, должны быть определены вплоть до размеров, близких к 1 нм, то есть размера, при котором происходит образование частиц

Разница в размерах между молекулами, кластерами и частицами (около 1-3 нм) представляет собой проблему как для теории, так и для экспериментов. Даже мельчайшие аэрозольные частицы слишком сложны, чтобы их можно было рассматривать с помощью квантовой механики, но теории макроскопических частиц начинают давать сбои на молекулярном пределе, а термодинамические свойства очень маленьких частиц плохо известны или плохо определены. Экспериментаторы могут использовать масс-спектрометры для измерения молекул и ионов газовой фазы, но наиболее часто используемые счетчики частиц работают только для аэрозольных частиц размером более примерно 3 нм. Таким образом, в наших знаниях о частицах размером менее 3 нм существует пробел, как раз в том диапазоне размеров, который имеет решающее значение для образования новых частиц.

Здесь мы сосредоточимся на методах обнаружения наночастиц. Измерение наночастиц является очень сложной задачей из-за их малого размера и ничтожной массы. Наночастицы также чрезвычайно диффузионны, что приводит к значительным потерям в измерительной системе; они не могут быть эффективно заряжены, поскольку вероятность их зарядки мала; их невозможно непосредственно обнаружить оптически; и для их роста требуются большие перенасыщения. Существуют в основном два различных метода измерения наночастиц:

подсчет частиц конденсата (раздел 7.2.1) и электростатические методы (раздел 7.2.2).

7.2.1 Подсчет частиц конденсата

Поскольку наночастицы намного меньше длины волны видимого света, их невозможно непосредственно наблюдать оптически, как более крупные частицы аэрозоля. Принцип работы счетчика частиц конденсации (CPC; ранее часто назывался счетчиком ядер конденсации, CNC) заключается в следующем: аэрозоль подвергается воздействию пересыщенного пара, который конденсируется на частицах, делая их достаточно крупными, чтобы их можно было наблюдать оптическими методами. Сверхнасыщение может быть создано по меньшей мере тремя различными способами: (i) адиабатическим расширением, (ii) термодиффузией в ламинарном потоке или (iii) смешиванием двух потоков с разными температурами или свойствами. Эти методы также служат классификацией различных типов КПК.

КПК использовались для исследований аэрозолей более века. Первые конденсационные счетчики ядер, основанные на конденсации водяного пара на поверхности аэрозольных частиц, были разработаны индивидуально М. Кулье и Дж. Эйткеном в конце девятнадцатого века (McMurry, 2000). Практически все ранние ЧПУ были устройствами расширительного типа, в которых в качестве конденсирующегося пара использовалась вода. Современные CPC с оптикой для подсчета отдельных частиц, которые обычно содержат либо спирт, либо воду в качестве рабочей жидкости, были разработаны в 1970-х годах. Их измерения.

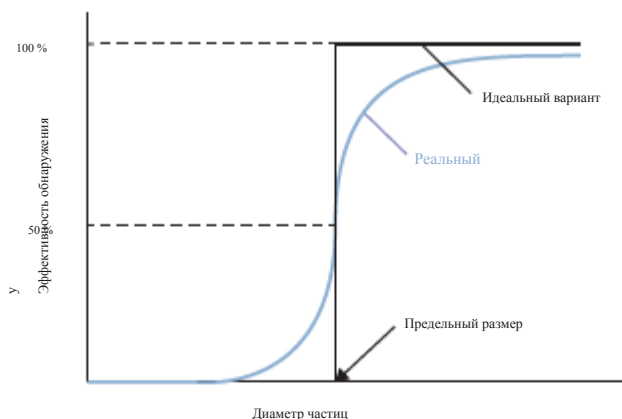


Рисунок 7.3 Определение предельного размера счетчика частиц конденсата (CPC).

Нижний предел размера диапазона измерений CPC описывается его предельным размером. Предельный размер определяется как наименьший диаметр частиц, при котором прибор все еще обнаруживает по крайней мере половину частиц (рис. 7.3). Лю и Ким (1977) были первыми, кто заметил, что эффективность обнаружения CPC падает, когда он приближается к меньшим размерам, хотя в идеале кривая эффективности подсчета должна представлять собой ступенчатую функцию. Предельный диаметр и крутизна предельной кривой определяются как вероятностью активации частиц, так и диффузионными потерями частиц внутри прибора. Вероятность активации, то есть доля частиц, которые начинают расти внутри CPC, в свою очередь зависит как от профиля пересыщения, созданного в приборе, так и от физико-химических свойств частиц, таких как их состав, электрический заряд и форма.

Недавно было приложено много усилий для разработки CPC, которые могут измерять частицы вплоть до молекулярных размеров (например, Mordas *et al.*, 2005; Kulmala *et al.*, 2007b; Sipilä *et al.*, 2008, 2009, 2010; Vanhanen *et al.*, 2011; Иида, Штольценбург и Макмарри, 2009; Цзян *et al.*, 2011). Предельный размер CPC может быть уменьшен за счет минимизации диффузионных потерь внутри прибора и / или за счет увеличения достигаемого пересыщения. Однако, когда пересыщение слишком велико, начинается гомогенное образование зародышей в рабочей жидкости, что приводит к ложным фоновым значениям. Иида, Штольценбург и Макмарри (2009) оценили различные рабочие жидкости и пришли к выводу, что, выбрав рабочую жидкость с высоким поверхностным натяжением, но достаточно низким давлением насыщающих паров, можно добиться высокого перенасыщения без значительного гомогенного образования зародышей. Основываясь на этом исследовании, жидкостью, выбранной несколькими различными исследовательскими группами, был диэтиленгликоль (DEG; Vanhanen *et al.*, 2011; Jiang *et al.*, 2011). Однако для достижения оптически определяемых размеров приборам на основе DEG требуется второй этап - ускоритель роста с использованием воды или спирта.

В мастерских для сравнения различных CPC сообщалось, что приборы смесительного типа имеют очень низкие размеры отсечки (Bartz *et al.*, 1985; Анкилов *et al.*, 2002). Работа Фернандеса де ла Мора и его группы особенно продемонстрировала превосходство приборов типа смешивания в обнаружении мелких частиц (например Сето *et al.*, 1997; Гамеро-Кастаньо и Фернандес де ла Мора, 2000). Первым коммерчески доступным прибором с ограничителем размером 1,5 нм, который мог активировать значительное количество частиц даже при длине волны 1 нм, был увеличитель размера частиц (Airmodus A09; Vanhanen *et al.*, 2011), который представляет собой смеситель CPC, использующий DEG в качестве рабочей жидкости.

Коэффициент CPC по умолчанию измеряет общее количество частиц, превышающих определенный размер. Различия между показаниями концентрации двух или более CPC с разными предельными размерами (например, Brock *et al.*, 2000; Kulmala *et al.*, 2007a) - или среди показаний одного CPC, предельный размер которого можно быстро изменять (Гамеро-Кастаньо и Фернандес де ла Мора, 2000; Ванханен *et al.*, 2011) - может давать информацию о концентрации частиц в небольшом диапазоне размеров между предельными размерами. Размер частиц, лупа может быть использована в режим сканирования, непрерывно меняя пропорции смешивания потока и, следовательно, supersaturation, которая дает информацию о размере частиц между приблизительно 1 и 2 нм в диаметре (Ванханен *et al.*, 2011).

Другим методом получения информации о размере с использованием только CPC является метод анализа высоты импульса (например, Saros *et al.*, 1996). Этот метод основан на определении интенсивности света, рассеянного частицами после их конденсационного роста в CPC, который для белого света прямо пропорционален поперечному сечению рассеяния частицы и, следовательно, ее диаметру. Из-за градиента осевого перенасыщения, через который частицы проходят внутри трубки конденсатора прибора, частицы разного размера активируются в разных осевых положениях и имеют разное количество времени для роста до обнаружения. Чем меньше частица, тем позже она будет активирована, что приведет к уменьшению конечных размеров капель. Величина импульса CPC чувствительна к размеру только при размерах менее примерно 15 нм, поскольку все более крупные частицы активируются почти немедленно, что приводит к получению конечных капель одинакового размера, информация о размере которых теряется в процессе роста. Анализ высоты импульса использовался для получения информации о частицах размером от 3 до 10 нм (Weber, 1997) и даже менее 3 нм (Sipilä *et al.*, 2008, 2009, 2010; Лехтипало *et al.*, 2009, 2010).

Разработка приложений CPC, которые могут одновременно измерять концентрацию и предоставлять информацию о размере, имеет преимущество по сравнению с электрическими методами измерения, особенно при малых размерах, поскольку CPC обнаруживает как нейтральные, так и заряженные частицы без необходимости нейтрализовать совокупность частиц и без дополнительных диффузионных потерь, которые принесло бы отдельное устройство для выбора размера. Кроме того, отношение сигнал/шум при низких концентрациях лучше благодаря подсчету отдельных частиц. Однако заряд и химические свойства наночастиц влияют на вероятность их активации в CPC и могут повлиять на измерения вблизи предельного размера прибора. Предельный размер CPC для материала, который растворим в рабочей жидкости, ниже, чем для нерастворимого материала (например, Анкилова, *et al.*, 2002; Hering and Stolzenburg, 2005; Petäjä *et al.*, 2006; Kulmala *et al.*, 2007a). По словам Винклера *et al.* (2008), отрицательные ионы активируются при меньших размерах, чем положительные, и обе полярности активируются раньше нейтральных частиц.

Используя материальную зависимость предельных размеров, CPC также могут быть использованы для получения косвенной информации о химическом составе наночастиц. Путем сравнения количества двух CPC (или нескольких пар), откалиброванных до одинакового размера отсечки с использованием нерастворимых тестируемых частиц (например, серебра), но с разными рабочими жидкостями (так называемая батарея CPC; Kulmala *et al.*, 2007a; Риипинен *et al.*, 2009), можно обнаружить изменения в составе частиц в положении в диапазоне размеров, близком к предельному размеру. Кроме того, был использован анализ высоты импульса для получения информации о составе (O'Dowd *et al.*, 2002a, 2004).

7.2.2 Электростатические методы

Даже с мельчайшей частицей можно легко обращаться и обнаруживать, если она обладает электрическим зарядом. Движение заряженных частиц (ионов) в электрическом поле определяется их

электрическая подвижность, которая в первую очередь зависит от их размера и состояния зарядки.

Таким образом, частицы могут быть подобраны по размеру электрическими методами, что дает так называемый "эквивалент электрической подвижности диаметра". Концентрацию заряженных частиц можно определить путем измерения тока, подаваемого потоком ионов к электрометру. Ограничением электрометров является их чувствительность, поскольку токи очень малы, особенно при низкой концентрации ионов.

Важным инструментом, используемым для производства аэрозольных проб известно подвижности является дифференциальный анализатор подвижности (DMA; Кнутсон и Уитби, 1975; Лю, Пуи, 1974; рейс-ХЛ, Мякеля, и Нецид, 1997 Winklmayr *et al.* 1991, Штольценбург и Макмарри, 2008). Существует множество различных конструкций и конфигураций DMA, но диффузионное расширение передаточной функции ухудшает разрешающую способность большинства из них при размерах менее 3 нм (Штольценбург, 1988). Потребность в измерениях длиной волны менее 2 нм привела к появлению нескольких DMA с высоким разрешением, которые используют высокие скорости потока и, таким образом, способны определять размер ионов даже при длине волны 1 нм (например, Chen *et al.*, 1998; Россер и Фернандес де ла Мора, 2005; Штайнер *et al.*, 2010).

Когда электрические измерения используются для определения общего распределения аэрозоля по размерам, необходимо привести образец к известному распределению заряда с помощью принудительной зарядки /нейтрализации. Этого можно достичь с помощью искусственного униполярного или биполярного заряда (Flagan, 1998), такого как коронные разряды, радиоактивный источник или рентгеновское зарядное устройство. Эффективность зарядки мелких частиц очень низкая, около 1% при длине волны 3 нм (Хоппель и Фрик, 1986), что приводит к очень плохой статистике подсчета при размерах ниже этого, особенно при учете диффузионных потерь в системе. Кроме того, ионы, образующиеся внутри нейтрализатора, могут распространяться на длину около 2 нм в зависимости от полярности и состава воздуха, что затрудняет разделение между сигналом и ионами зарядного устройства в области перекрытия (например, Asmi *et al.*, 2009; Manninen *et al.*, 2011). Зарядка также может быть селективной в зависимости от состава частиц, поскольку определенные химические соединения, такие как кислоты, более склонны к принятию заряда, чем другие.

Распространенным инструментом для измерения общего распределения частиц атмосферного аэрозоля по размерам является DMPS или размер частиц сканирующей подвижности (SMPS) (Hoppel, 1981). Он состоит из нейтрализатора, используемого для приведения аэрозоля к зарядовому равновесию, DMA для выбора размера частиц и, как правило, CPC, используемого для подсчета концентрации частиц каждого размера класса. Существуют различные конфигурации протоколов калибровки и эксплуатации систем DMPS/SMPS и методов инверсии данных. Основной принцип заключается в выборе одного размера подвижности за один раз, измерении ее концентрации и сканировании в желаемом диапазоне размеров путем изменения напряжения классификации DMA.

Было предложено согласовать измерения DMPS, но различные приборы по-прежнему показывают большие отклонения, особенно для частиц размером менее 20 нм (Wiedensohler *et al.*, 2012). На момент написания статьи начинают появляться новые типы SMP, использующие DMA с высоким разрешением и CPC с низким уровнем отсеки (Цзян *et al.*, 2011), улучшающий обнаружение наночастиц. Однако в результате совокупного эффекта низкой эффективности зарядки, потерь в линиях отбора проб, эффективности проникновения DMA и эффективности обнаружения CPC статистика подсчета таких приборов резко падает при размерах менее 2 нм.

Ионная спектрометрия уже более века используется для исследования аэрозолей (например, Hirsikko *et al.*, 2011 и ссылки на него). Ионные спектрометры используют электрический заряд частиц для измерения их распределения по размерам. Выбор размера ионов обычно осуществляется на основе их подвижности в электрическом поле, а их концентрацию можно определить по току, который они подают на электрометр. Этот метод также применим для измерения общего распределения частиц по размерам, если его сначала привести к зарядовому равновесию. Ионные спектрометры

широко используются в исследованиях образования зародышей в атмосфере в диапазоне размеров менее 3 нм благодаря их способности измерять размеры вплоть до молекулярных.

В последнее время AIS (аэроионный спектрометр; Mirme *et al.*, 2007) и NAIS (Нейтральный кластер и аэроионный спектрометр; Маннинен *et al.*, 2009), произведенные компанией Airel, широко использовались по всему миру в исследованиях образования новых частиц (например, Kulmala *et al.*, 2007b; Маннинен *et al.*, 2010). Оба измеряют распределение подвижности положительных и отрицательных ионов одновременно с помощью двух параллельных DMA, но в NAIS также есть режим измерения общего распределения по размерам, в котором образец заряжается ионами, генерируемыми коронным разрядом, перед выбором размера. Секция электрического постфильтра используется для удаления ионов, образующихся в зарядном устройстве. Нижний предел размера ионного режима AIS и NAIS составляет около 0,8 нм., в то время как наименьший предельный размер НАИС в общем режиме составляет около 2 - 3 нм зависит от короны распределении ионов и пост-фильтрация (АСМИ *et al.*, 2009; Manninen *et al.*, 2011). В 2010 году был представлен NAIS второго поколения - аэрофотоснимок с нейтральным кластером и спектрометром воздушных ионов (A-NAIS) (Mirme *et al.*, 2010) и использовался для измерений на борту воздушных судов.

7.2.3 Масс-спектрометрические методы обнаружения скоплений

Совсем недавно развитие масс-спектрометрических методов сделало возможными атмосферные измерения ионных кластеров, и был достигнут некоторый успех в обнаружении нейтральных кластеров. Только масс-спектрометрические методы могут дать информацию о химических составе ионов и нейтральных кластеров в подразделе 3 нм диапазон диаметров. Для обнаружения скоплений в атмосфере используются два типа масс-спектрометров: квадрупольные масс-спектрометры и масс-спектрометры времени пролета (TOF). Общей особенностью является интерфейс атмосферного давления (APi), необходимый для перемещения образца из условий окружающего давления в высокий вакуум масс-анализатора.

Масс-спектрометры могут использоваться для характеристики популяции природных кластеров ионов или могут быть оснащены источником химической ионизации для зарядки нейтральных кластеров. Первые масс-спектрометрические исследования атмосферных молекулярных ионов и ионных кластеров относятся к 1980-м гг. и к выдающемуся двухколлизии-мерному тандемному трехквадрупольному масс-спектрометру Фреда Эйзеля (см. Эйзель, 1989 и ссылки в нем) (см. Eisele, 1989). Эйзель был первым, кто определил истинную природу тропосферных ионов. Его методы были настолько прогрессивными, что потребовалось более 20 лет, прежде чем значительный прогресс в измерительных технологиях позволил другим исследовательским группам подтвердить его выводы (Ehn *et al.*, 2010).

Квантовым скачком в масс-спектрометрии стала разработка масс-спектрометра на границе раздела атмосферное давление - время пролета (APi-TOF) (Junninen *et al.*, 2010), изготовлено компанией ToFwerk AG., Швейцария. В APi-TOF образец при атмосферном давлении проходит через три камеры с дифференциальной подачей в анализатор TOF. Первая и вторая камеры содержат короткие сегменты квадрупольных, используемые в режиме иона направления, а третья камера содержит узел ионных линз. Электрические поля в квадрупольных в значительной степени ответственны за определение пропускания ионов в зависимости от отношения массы к заряду и влияют на фрагментацию кластеров на основные ионы. Эта комбинация создает пучок ионов, который направляется в камеру TOF. В системе TOF ионы взаимодействуют с проходящим через пространство электрическим полем, которое придает им кинетическую энергию K в соответствии с номером z элементарных зарядов e переносимый ионом (атмосферные ионы обычно имеют $z = 1$), $K = Uze$. Кинетическая энергия определяет скорость движения иона, $K = \frac{1}{2}mv^2$, и скорость определяет время, необходимое для этого

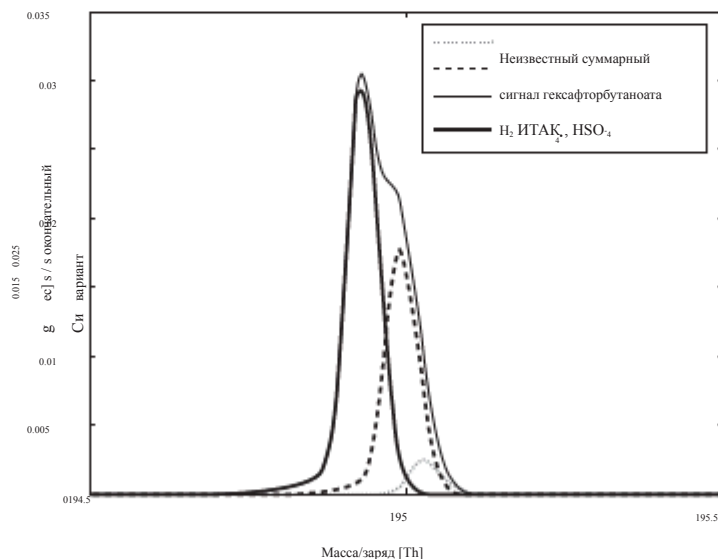
чтобы ион преодолел это расстояние s к детектору, $t = s/v = s(2Ue)^{-1/2}$

является прямой мерой отношения массы к заряду. Постоянная величина $s(2Ue)^{-1/2}$

калибровки с использованием известных ионов. В результате реальных эффектов зависимость между временем и m/z редко бывает точно линейной, поэтому часто желательна калибровка с использованием более чем двух масс.

Массовое разрешение TOF-анализатора зависит от расстояния s что ионы проходят путь до попадания на детектор. Чем больше расстояние, тем больше разделены во времени две массы. Чтобы максимально увеличить расстояние в компактном приборе, ионы не должны проходить линейный путь в APi-TOF, а скорее следовать V-или W-образной траектории. Такие траектории достигаются с помощью электрических полей внутри камеры полета, аналогично тому, что происходит, когда шар для боулинга подбрасывают вверх по склону. Массовое разрешение APi-TOF составляет примерно 3000 Тг/Тг в режиме V-, что означает, что при $m/z = 100$ Тг, например, ширина пика при половинном максимуме равна 0.033 Тг (если $z = 1$, пик от иона 100 Да (= 100 а.е.м.) имеет ширину 0,033 Да). Высокое разрешение имеет решающее значение, поскольку в атмосфере может быть несколько составляющих с одинаковой целочисленной массой, но их фактические массы будут незначительно отличаться из-за разного атомного состава. Для например, масса кластера бисульфат-ион-серная кислота, который часто присутствует в скоплении атмосферных ионных кластеров, составляет 194 927 Да, а масса гексафторбутаноата, искусственного соединения, которое может образовываться, например, из тефлоновых трубок, часто используемых в различных приборах, составляет 194 989 Да - разница составляет 0,06 Да (рис. 7.4). При недостаточном разрешении по массе два соединения невозможно было бы разделить, и для идентификации и количественного определения ионов с целой массой 195 потребовались бы другие методы, такие как предварительное измерение подвижности ионов (Jokinen *et al.*, 2012).

Помимо разрешения, точность определения массы также должна быть высокой, чтобы идентифицировать соединения по их точной массе. При правильной калибровке APi-TOF достигает массы с точностью 20 частей на миллион или выше, что означает, что при 100-й погрешности в m/z составляет менее 0,002 тыс.



Для разделения бисульфат-иона и серной кислоты требуется высокое разрешение по массе Рисунок 7.4 представляет интерес скопление гексафторбутаноата, получаемого из искусственных материалов, который не имеет ничего общего с составом атмосферы.

Наряду с точной массой, для идентификации пиков также обычно используются изотопные распределения. Высокое разрешение и массовая точность также могут быть достигнуты, например, с помощью трехквadrupольного масс-спектрометра и не являются уникальными для TOF. Основное преимущество TOF масс-спектрометра по сравнению с квадрупольными системами заключается в том, что с помощью TOF одновременно измеряется весь масс-спектр. Для того, чтобы достичь разумного срока решения с квадрупольной масс-спектрометрии, которая способна измерять только один m/z со временем измеренные массы должны были бы быть выбраны заранее, поэтому полученная информация была бы очень ограниченной.

APi-TOF - это не инструмент "подключи и играй"; для его эффективного использования требуется высокоавтоматизированное программное обеспечение для обработки данных, такое как недавно разработанный *TofTools* (Junninen *et al.*, 2010). Программное обеспечение для обработки данных действительно следует рассматривать как один из важнейших компонентов APi-TOF.

Несмотря на высокую производительность APi-TOF, он обнаруживает только ионы. Для обнаружения нейтральных компонентов и кластеров их необходимо зарядить. Селективная ионохимическая ионизация при атмосферном давлении оказалась высокоэффективным методом загрузки молекулярной серной кислоты для последующего масс-спектрометрического детектирования (Eisele and Tanner, 1993). Масс-спектрометр химической ионизации (квадрупольный) (CI-MS) широко использовался для обнаружения атмосферной серной кислоты с выдающейся чувствительностью порядка нескольких 10^4 молекулы на cm^{-3}

(Eisele and Tanner, 1993; Petäjä *et al.*, 2009). Прибор использует нитрат-ионы и их кластеры с азотной кислотой для химической ионизации серной кислоты посредством переноса протона от серной кислоты к нитрат-иону с образованием кластера бисульфат-ион - азотная кислота. При необходимости этот кластер может быть диссоциирован до чистого бисульфат-иона перед массовой фильтрацией с помощью средств столкновений, вызванных электрическим полем, в камере диссоциации столкновений.



Тот же химический анализ был применен для обнаружения нейтральной серной кислоты, содержащей кластеры, с предположением, что они заряжаются при столкновениях с нитрат-ионом (Эйзеле и Хэнсон, 2000; Хэнсон и Эйзеле, 2002; Хэнсон и Лавджой, 2006; Чжао *et al.*, 2010).

Это не обязательно всегда верное предположение, как теоретически показал Куртен *et al.* (2011).

Хотя было доказано, что в лабораторных пробирках для нуклеации с относительно высокими концентрациями нейтральных кластеров системы CI-MS на основе нитрат-ионов в некоторой степени работают для обнаружения нейтральных кластеров (Hanson and Lovejoy, 2006; Petäjä *et al.*, 2009), проблемы, связанные с их применением для обнаружения скоплений в окружающей атмосфере, многочисленны (Йокинен *et al.*, 2012). Во-первых, ряд различных соединений могут заряжаться при столкновении с нитрат-ионом либо путем переноса заряда, либо кластеризации с нитрат-ионом. Большинство из результирующий сигнал не исходит от нейтральных кластеров, но может иметь почти Иден- тическими ионам ожидается получить в результате осуществления зарядки нейтральных кластеров. Большинство

m/z

суточный цикл соединений также аналогичен циклу, ожидаемому для кластеров серной кислоты, поэтому поведение во времени нельзя использовать прямолинейно. Таким образом, требуется высокое разрешение по массе и низкая концентрация составляющих, которые формируют перекрывающийся сигнал. Во-вторых, естественно заряженные ионы могут проникать через систему ионизации и обнаруживаться масс-спектрометром. Поскольку калибровочный коэффициент для преобразования измеряемого сигнала в нейтральную концентрацию обычно велик, даже незначительные концентрации ионов могут повлиять на точность измерения. В-третьих, ионно-индуцированная кластеризация, например, серной кислоты, легко происходит внутри источника ионов после ионизации молекулярной серной кислоты. Если нейтрально-кластерная

при низких концентрациях кластеры, образованные в результате присоединения иона к молекуле, могут подавлять сигнал от нейтральных элементов. Любой эксперимент должен быть разработан таким образом, чтобы ионно-индуцированное образование кластеров можно было отделить от заряда нейтрального кластера (Zhao *et al.*, 2010). В-четвертых, нет надежных экспериментальных данных о вероятностях зарядки кластеров с различным химическим составом; они могут заряжаться, но с неизвестной вероятностью (Куртен *et al.*, 2011).

Фундаментальная проблема, лежащая в основе этих вызовов, заключается в том, что концентрации кластеров с определенным составом, как ожидается, будут очень низкими, а концентрация нейтральных кластеров с определенным составом, как ожидается, будет уменьшаться с увеличением размера кластера и сложности. CI-API-TOF, вероятно, является наиболее чувствительным масс-спектрометром, доступным для обнаружения кластеров. Предполагая отсутствие помех от других компонентов газовой фазы или ионов, вероятность заряда кластера, ограниченную столкновением, концентрация составляет около 10^{-4} кластеры на каждой композиции потребуется обеспечить количественную оценку достаточного количества сигнала с помощью CI-API-TOF (Jokinen *et al.*, 2012).

7.3 Атмосферные наблюдения за образованием новых частиц

7.3.1 Зарождение

Разработчик первого счетчика ядер конденсации Дж. Эйткен также был первым, кто понял, что частицы могут образовываться в атмосфере в результате фотохимических процессов (Aitken, 1911). С тех пор в сотнях статей было показано, что образование новых частиц является распространенным явлением, которое часто происходит почти повсюду в окружающей среде (Кулмала *et al.*, 2004a). Наблюдения за образованием новых частиц проводились как в нетронутой окружающей среде, так и в районах с сильным антропогенным воздействием, включая бореальные леса (Мякеля, 1997; Вебер *et al.*, 2004), сельские районы (Вебер *et al.*, 1997; Бирмили *et al.*, 2003), африканская саванна (Ваккари *et al.*, 2011), Антарктида (Asmi *et al.*, 2010), и крупные города (Венер *et al.*, 2004; Mönkkönen *et al.*, 2005). Самая продолжительная по времени серия измерений распределения аэрозолей по размерам и статистических данных о событиях образования новых частиц поступает с измерительной станции Huutialä SMEAR II на юге Финляндии (Хари и Кулмала, 2005), начиная с 1996 года. Помимо пограничного слоя, были проведены наблюдения за образованием новых частиц в свободной тропосфере с высотных станций и самолетных измерений (например, Вензак, Селлегри и Ладж, 2007; Mirmé *et al.*, 2010).

Образование новых частиц - это в основном дневное явление, лишь за несколькими исключениями (Виденсолер *et al.*, 1997; Vehkamäki *et al.*, 2004; Ли *et al.*, 2008; Suni *et al.*, 2008), хотя концентрация ионов и частиц размером менее 3 нм иногда может увеличиваться в течение ночи (Junninen *et al.*, 2008; Лехтипало *et al.*, 2011). Это указывает на важность фотохимии на каком-то решающем этапе процесса формирования. Другими характеристиками, общими для условий, благоприятных для образования новых частиц, являются низкий уровень отвода конденсата (ранее существовавшая концентрация аэрозоля), низкая относительная влажность и высокая скорость образования паров (Кулмала и Керминен, 2008).

Общепризнано, что серная кислота является ключевым соединением, ответственным за образование в атмосфере новых частиц (например, Weber *et al.*, 1997; Хансон и Эйзеле, 2002; Сихто *et al.*, 2006; Куанг *et al.*, 2008; Petäjä, Kerminen, and Kulmala, 2009; Nieminen *et al.*, 2009; Sipilä *et al.*, 2010). Однако многие исследования показывают, что зародышеобразование только бинарной серной кислоты и воды

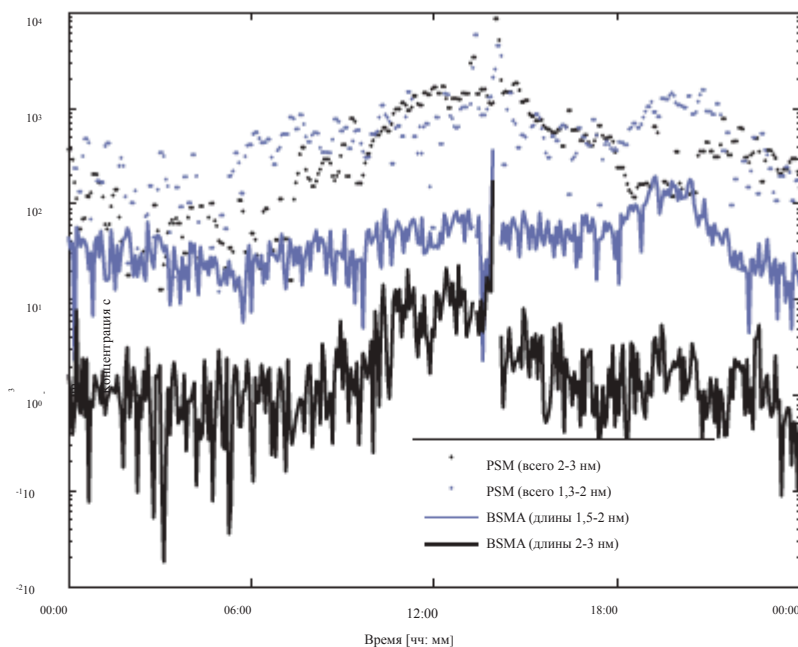
не может объяснить наблюдения образования новых частиц в тропосфере (например, Вебера *et al.*, 1996, Kulmala *et al.*, 1998; Fiedler *et al.*, 2005; Мальчик *et al.*, 2005; Wehner *et al.*, 2005; Киркби *et al.*, 2011). Как квантово-химические расчеты, так и экспериментальные данные показывают, что для стабилизации кластеров серной кислоты могут потребоваться основания, такие как аммиак или амины (например, Hanson and Eisele, 2002; Torgo *et al.*, 2007; Куртен *et al.*, 2008, Ehn *et al.*, 2010, Ю. *et al.*, 2012).

Косвенные и прямые измерения химического состава показали наличие органических соединений в ультрадисперсных частицах (O'Dowd *et al.*, 2002a; Смит *et al.*, 2008; Riipinen *et al.*, 2009). Однако отличить зарождение от первоначального роста было невозможно до самого недавнего времени, поскольку большинство измерений начиналось с размеров, при которых рост уже имел место. Некоторые утверждают, что органические вещества влияют только на рост, в то время как другие говорят, что они оказывают влияние на стадии зарождения (Metzger *et al.*, 2010; Paasonen *et al.*, 2010). Способность летучих органических соединений (ЛОС) образовывать частицы была продемонстрирована во многих лабораторных и камерных экспериментах (например, Mentel *et al.*, 2009). ЛОС представляют собой большую группу различных соединений, выбрасываемых как антропогенными источниками, так и растительностью. Они могут окисляться в атмосфере с образованием менее летучих продуктов, которые, таким образом, могут конденсироваться в фазу частиц. По мере роста частиц перенасыщение, необходимое для конденсации, уменьшается в результате эффекта Кельвина, и даже пары с более высоким давлением насыщенных паров могут начать конденсироваться. Связь между различными соединениями и образованием частиц сложна, поскольку некоторые ЛОС также могут ингибировать образование частиц, возможно, действуя как ОН поглотители (Kiendler-Scharr *et al.*, 2009).

Морская среда представляет собой особый случай образования новых частиц, и нуклеация редко наблюдается над океаном. Однако на прибрежных участках, сильные локальные всплески образования новых частиц часто происходят во время дневного отлива (O'Daуд *et al.*, 2002b; Юн *et al.*, 2006). Образование зародышей в прибрежных районах тесно связано с биологическими выбросами йодсодержащих соединений, которые перерабатываются в результате фотохимических реакций, когда водоросли подвергаются воздействию солнечного света (O'Daуд *et al.*, 2002b, c).

Все еще существуют споры относительно важности ионов в образовании новых частиц. Электрический заряд в принципе может способствовать как зарождению, так и росту (Laakso *et al.*, 2003; Киркби *et al.*, 2011). Поскольку величина электрического заряда, а следовательно, и малых ионов в атмосфере, ограничена скоростью ионизации, относительная роль ионно-индуцированного образования ядер, по-видимому, уменьшается с увеличением общей скорости образования частиц (Ганье *et al.*, 2010; Manninen *et al.*, 2010). В среднем иониндуцированная доля в пограничном слое, по-видимому, составляет в основном около 10% или ниже (Iida *et al.*, 2006; Gagné *et al.*, 2008; Manninen *et al.*, 2010; Kulmala *et al.*, 2010), хотя в литературе можно найти и более высокие оценки (Ю. и Турко, 2008; Ю. *et al.*, 2008). Однако ионы могут быть более важными в начале образования частиц (Laakso *et al.*, 2007a,b) и ионно-опосредованная нуклеация, вероятно, будет важна при некоторых условиях и в окружающей среде - например, в верхних слоях тропосферы (Curtius *et al.*, 2006; Ю., 2010).

Величина вторичного образования частиц как источника атмосферных аэрозолей и зародышей конденсации облаков (CCN) может быть очень чувствительной к первым этапам процесса образования и роста частиц. Причиной недостатка знаний о процессе нуклеации была неспособность обнаружить или химически идентифицировать исходные кластеры и их предшествующие пары сорбента при уровнях концентрации в атмосфере. Недавнее развитие методов измерения (глава 2) предоставило нам инструменты для достижения этих размеров. А Continuous существования малых ионов в атмосфере, было известно в течение по крайней мере столетия



Общая концентрация частиц в диапазоне 1,3- 2,0 нм и подвижность 2,0 -3,0 нм **Рисунок**

7.5 диаметр, измеренный прибором Airmodus A09 PSM на станции Hyvitiälä SMEAR II 16.8.2010, и концентрация ионов в соответствующих классах размеров, измеренная ионным спектрометром BSMA. Цветную версию смотрите в разделе "таблички".

существование их нейтральных аналогов было сомнительным, поскольку их не удалось обнаружить.

Используя модельные расчеты, Кулмала *et al.* (2000, 2005) предсказал бассейн нейтральных кластеров

как объяснение наблюдаемой новых частиц-формирование событий и нейтральный pre-nucleation

кластеров были измерены в лабораторных экспериментах (Хэнсон и Айзель, 2002). Вебер

et al.

(1995) обнаружил крупные молекулярные кластеры во время событий зарождения ядра в Мауна-Лоа, Гавайи. Постоянное существование нейтральных скоплений в атмосфере было впервые измерено

Кулмалой. *et al.* (2007b) и Сипила *et al.* (2008). Недавно технология увеличителя размера частиц

(PSM) позволила проводить более количественные измерения нейтральных частиц размером менее

3 нм и кластеров (рис. 7.5). Однако диапазоны размеров молекул, кластеров (из нескольких молекул) и крошечных аэрозольных частиц перекрываются, и обычно невозможно провести различие между

ними с помощью физических измерений. Кроме того, терминология, касающаяся атмосферных

объектов размером менее 3 нм, неоднозначна. Поэтому было введено понятие "нано-CN" (ядра

конденсации нанометрового размера) (Чжао *et al.*, 2010; Лехтипало *et al.*, 2010; Макмарри *et al.*,

2011). Лехтипало исследовал динамику и концентрации нанонитей размером менее 3 нм в

атмосфере. *et al.* (2009, 2010) и Цзян *et al.* (2011) но роль нано-CN и

ионных кластеров в образовании частиц все еще нуждается в изучении и количественной оценке.

7.3.2 Рост

Скорость роста новообразованных частиц в конечном итоге определяет, какая из них достигает размера, при котором они могут рассеивать свет и действовать как CCN и, таким образом, влиять на климат, прежде чем они будут поглощены различными процессами потери. Скорость роста также может давать информацию о количестве и свойствах конденсирующихся паров в атмосфере.

Пространственная область, в которой происходит образование новых частиц, влияет на форму и эволюцию во времени измеренных распределений по размерам. Если источником частиц является относительно небольшая область (точечный или линейный источник) вблизи места измерения, смещение (рост) частиц в сторону больших размеров обычно не наблюдается. Однако, когда образование происходит на большей площади, за кажущимся ростом частиц можно проследить по распределению размеров измерений на фиксированном участке. Таким образом, для региональных событий образования новых частиц скорость роста вновь образованных частиц может быть определена по временной эволюции измеренного распределения по размерам. Для этого существует несколько методов, таких как следование геометрическому среднему диаметру режима зарождения (Дал Мазо *et al.*, 2005) или определение времени достижения максимальной концентрации для бункера каждого размера (Hirsikko *et al.*, 2005). Иида *et al.* (2008) использовали зависимость заряженной доли частиц от размера для определения скорости их роста. Временной лаг между повышением концентрации серной кислоты и появлением мельчайших обнаруживаемых частиц также использовался для оценки скорости роста в начале образования частиц (Weber *et al.*, 1997; Сихто *et al.*, 2006).

Скорость роста частиц в режиме нуклеации, по-видимому, обычно варьируется от 1 до 20 нм в атмосфере (Yli-Juuti *et al.*, 2011 и ссылки на него). Наблюдались более высокие значения, например, в загрязненных (Iida *et al.*, 2008) и прибрежных (О'Дауд *et al.*, 2007) районах, где источников конденсирующихся паров множество.

Наблюдения за зависимостью роста от размера редки, поскольку часто темпы роста были интегрированы по большим интервалам размеров и времени. Есть указание на то, что скорость роста увеличивается с увеличением размера (Хирсикко *et al.*, 2005; Или-Джуути *et al.*, 2011; Куанг *et al.*, 2012). Пренебрежение зависимостью от размера может привести к значительному завышению вероятности выживания частиц в климатических моделях (Kuang *et al.*, 2012). Кроме того, скорость роста ниже 3 нм демонстрирует сезонные колебания, отличные от скорости роста при больших размерах в бореальных лесах (Хирсикко *et al.*, 2005; Или-Джуути *et al.*, 2011), указывающий на то, что основной конденсирующийся пар(пары) может изменяться в процессе роста. Доля роста, которую может объяснить серная кислота, также, по-видимому, уменьшается с увеличением размера частиц (Фидлер *et al.*, 2005; Куанг *et al.*, 2012), и обычно другие пары ответственны за основную часть роста (например, Бирмили *et al.*, 2003; Мальчик *et al.*, 2005; Nieminen *et al.*, 2010; Riipinen *et al.*, 2011).

По техническим причинам, рассмотренным в главе 2, измерения распределения по размерам, распространяющиеся на размеры молекул, до сих пор были возможны только для естественно заряженных частиц, и, таким образом, информация о росте в диапазоне размеров менее 3 нм также была ограничена ионами. Или-Джуути *et al.* (2011) сравнили различные методы и инструменты для расчета темпов роста и пришли к выводу, что относительная неопределенность между ними увеличивается в сторону меньших размеров, составляя примерно на 25% ниже 3 нм. Из-за различий в их динамике, малых ионов может иметь различных темпов роста до нейтральных частиц населения (Leppä *et al.*, 2011). Новые методы и инструменты начинают предоставлять информацию о первоначальном росте общей популяции частиц (Kuang *et al.*, 2012; Ю. *et al.*, 2012).

7.4 Лабораторные Эксперименты

7.4.1 Образование зародышей серной кислотой

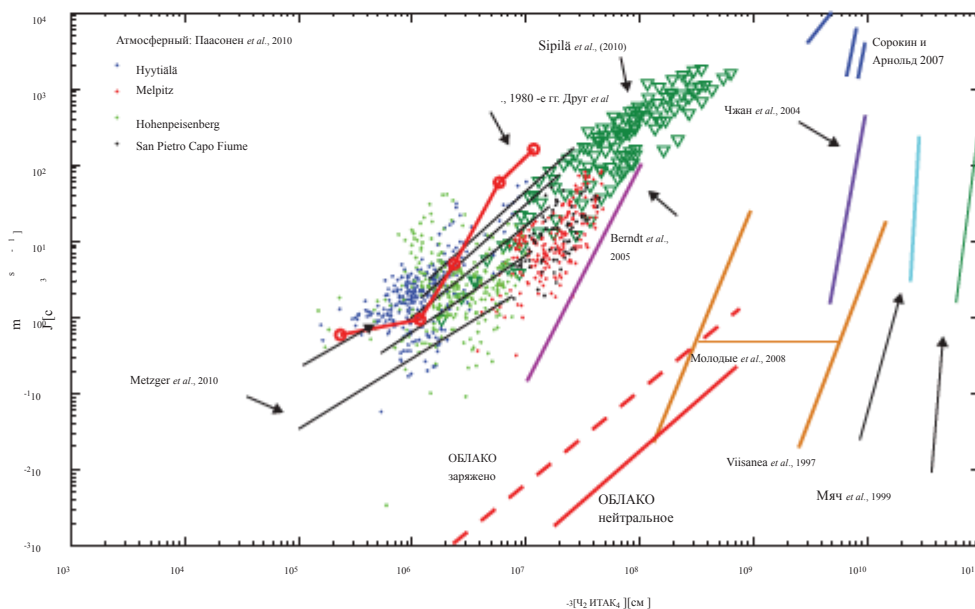
Как уже обсуждалось, зарождение - или, по крайней мере, образование - новых частиц в атмосфере легко происходит в присутствии серной кислоты в концентрациях порядка концентрации атмосферных частиц

10^6 молекулы, см^{-3} . По этой причине нуклеация серной кислоты водой и тройными соединениями широко исследовалась, как теоретически, с использованием классических методов (например, Мирабель и Кац, 1974; Вехкамяки *et al.*, 2002) и квантово - химические (например, Куртен *et al.*, 2008, 2010, 2011) подходов и экспериментально в различных лабораториях, обычно с использованием расходомерных трубок или камер.

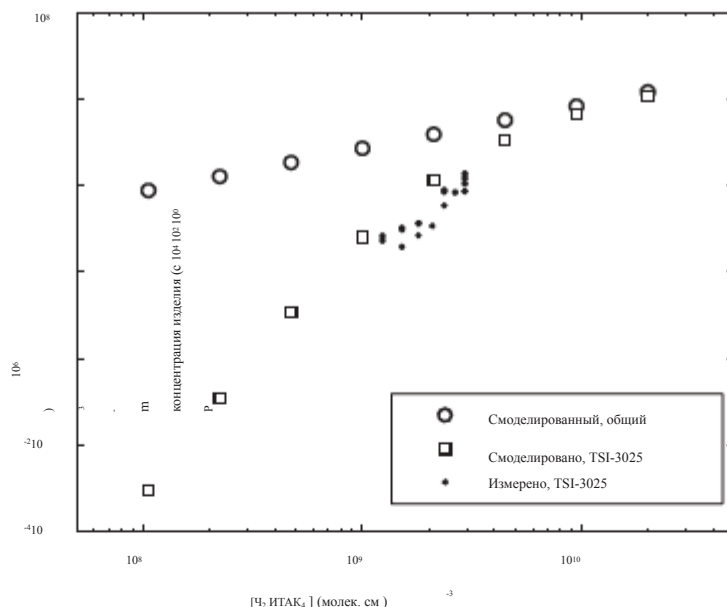
Лабораторные эксперименты, проведенные в системах, по-видимому, содержащих только серную кислоту и воду, дали противоречивую информацию о скоростях образования зародышей и начальных концентрациях серной кислоты (концентрация, необходимая для получения скорости образования зародышей в 1 частицу $\text{см}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$), изменяющийся на несколько порядков величины (рис. 7.6). Было показано, что некоторые разногласия являются результатом технических проблем при разработке эксперимента (Sipilä *et al.*, 2010). Скорость роста новообразованных частиц при конденсации серной кислоты *et al.* слишком медленно: приблизительно всего 1 нм / ч в течение $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 10^7$ молекулы, см^{-3}

(Nieminen

et al., 2010). Следовательно, при отсутствии либо достаточно длительного времени пребывания, либо детектора частиц, способного измерять частицы диаметром значительно меньше 3 или 2 нм, зависящая от размера эффективность обнаружения детектора фальсифицирует истинную концентрацию зародышеобразующих частиц (Sipilä *et al.*, 2010). Этот эффект визуализирован на рис. 7.7. Большинство экспериментов проводилось в расходомерных трубках до эксперимента в Сипиле. *et al.* (2010) неизбежно страдали от короткого времени пребывания (от секунд до нескольких минут), быстрой потери серной кислоты на стенках трубки, и низкой эффективности подсчета CPC, используемого для обнаружения зародышеобразующих частиц. Поточные эксперименты, проведенные с использованием кластерного масс-спектрометра в качестве детектора (Eisele and Hanson, 2000; Hanson and Eisele, 2002; Hanson and Lovejoy, 2006; Петая *et al.*, 2011), конечно, не испытывают подобных проблем с подсчетом, как у CPC, но на эффективность подсчета селективных CI-MS могут влиять различные причины (Kurtén *et al.*, 2011).



Наблюдаемая скорость образования зародышей в зависимости от концентрации серной кислоты, полученная Рисунок 7.6 из подборки различных лабораторных экспериментов. Цветовое исполнение смотрите в разделе "Табличка".



Смоделированная общая концентрация и смоделированное количество "обнаруженных" частиц, предположительно- Рисунок

7.7 определение предела обнаружения в зависимости от размера TSI-3025A CPC на выходе IfT-LFT (Институт тропосферных исследований - Ламинарная проточная труба). В этом моделировании серная кислота впрыскивается в начало расходомерной трубки длиной 5,05 м, и предполагается, что общее время пребывания составляет 379 секунд. Для сравнения, концентрация измеряется посредством Ци-3025А показано КТК. В

скорость зародышеобразования выражается в Дж = $3 \cdot 10^{-6}$ [Ч₂ ИТАК₂]¹, механизм, описывающий данные, полученные Sipilä et al. (2010) в IfT-LFT, и предполагается, что рост является результатом чистой конденсации серной кислоты. В зависимости от начальной концентрации серной кислоты кажущаяся концентрация частиц искажена из-за недостаточного роста. При концентрации серной кислоты

приближается к $< 10^6$ молекул см⁻³, никаких частиц не может наблюдаться. атмосферному диапазону дальше.

7.4.2 Охота на соединение X

Качественное объяснение расхождений между многими более ранними экспериментами с расходящимися трубками было дано Сипилой et al. (2010), которым действительно удалось установить релевантную для атмосферы связь между скоростью образования зародышей и концентрацией серной кислоты при очевидном отсутствии тройных соединений (т.е. без добавления каких-либо тройных соединений в систему). В продолжающемся исследовании, выполненном в той же системе с использованием масс-спектрометра для обнаружения кластеров серной кислоты, было обнаружено, что димеры серной кислоты, образующиеся в системе на начальной стадии процесса нуклеации, настолько прочно связаны, что требуется присутствие некоторого стабилизирующего соединения (Petäjä et al., 2011). Квантово-химическое моделирование, сопровождаемое динамическим моделированием образования кластеров, предположило, что стабилизирующее соединение с стабилизирующей способностью, аналогичной способности диметиламина, могло бы объяснить наблюдения, если бы присутствовало в системе в концентрации всего несколько 10^7 молекул, см⁻³.

. Такое соединение

может быть ответственно за скорость образования частиц, наблюдаемую в эксперименте Сипилы et al(2010), а также в некоторых других экспериментах (включая Берндта et al., 2005) и в окружающей атмосфере. В связи с этим наблюдением и предыдущими полевыми наблюдениями Мякеля et al(2001) и Смит et al(2010), а также теоретические выводы Куртена. et al.

(2008), за последние год или два было проведено несколько лабораторных исследований по усилению действия различных органических аминов (Berndt *et al.*, 2010; Бенсон *et al.*, 2011; Чжао *et al.*, 2011). Во всех этих исследованиях сообщается об увеличении скорости образования зародышей при введении амина. Аналогичные усиливающие эффекты на скорость образования зародышей были зарегистрированы для аммиака. Однако, самые последние работы предполагают, что требуемые концентрации слишком высоки для стабилизирующего эффекта аммиака, чтобы объяснить скорость образования зародышей в пограничном слое атмосферы (Kirkby *et al.*, 2011).

Органика является вероятным кандидатом для объяснения скорости образования зародышей в атмосфере, поскольку большинство микроэлементов в атмосфере являются органикой, по крайней мере, в пограничном слое. Очевидно, что большинство органических веществ не способны к образованию зародышей. Органические амины, обсуждавшиеся ранее, часто отделяются в просторечии от остальных органических соединений, которые содержат только углерод, водород и кислород. Роль окисленной органики в образовании зародышей была исследована в камерном исследовании Мецгера *et al.* (2010), основываясь на полученных результатах, воз предположила, что атмосферное сферическое образование зародышей может быть инициировано образованием кластера, содержащего одну молекулу серной кислоты и одну молекулу образующих зародыши окисленных органических паров. Этот результат получает подтверждение в эксперименте Чжана с расходомерной трубкой *et al.* (2004), которые показали, что определенные органические вещества способны вносить свой вклад в начальные этапы образования частиц, если не в зарождение, по крайней мере, на ранних этапах роста. Однако этот эксперимент проводился с относительно высокими концентрациями серной кислоты и страдает от короткого времени пребывания и зависимости от размера подсчета частиц, о котором говорилось ранее. Таким образом, требуется еще больше экспериментальной работы, прежде чем можно будет объявить, что незотсодержащие органические соединения участвуют в образовании зародышей, и оценить их общую роль во вторичном образовании частиц.

7.5 Заключительные замечания и будущие задачи

Продолжайте работать над разгадкой механизмов зарождения в атмосфере и раннего роста растений. Одним из ключей к более глубокому пониманию этих процессов является непрерывная разработка новых методов и инструментов для прямого измерения концентрации, размера и химического состава вновь образующихся кластеров и их потенциальных предшественников. Необходимы более совершенные инструменты для обнаружения аминов в атмосфере и в экспериментальных лабораторных системах, например, для демонстрации их роли в образовании частиц. Для прогнозирования его глобального воздействия необходимы знания об образовании частиц на молекулярном уровне, а также об источниках и поглотителях газов-прекурсоров. Последние результаты Welz *et al.* (2012) указывают на то, что даже циклы серной кислоты до конца не изучены. Источники, поглотители аминов, и концентрации, а также факторы, их определяющие, все еще плохо изучены; то же самое справедливо и для других органических веществ, не содержащих азота.

Хотя работа по детальному пониманию механизмов образования зародышей в атмосфере продолжается, ясно одно: серная кислота играет решающую роль в ряде атмосферных условий (Sipila *et al.*, 2010; Киркби *et al.*, 2011; Чжао *et al.*, 2010) и является одним из ключевых соединений при зарождении ядра в атмосфере и образовании новых частиц. Серная кислота в основном образуется в результате фотоокисления диоксида серы, SO₂. SO₂ имеет три основных источника в атмосфере. - 2 сфера: вулканы, фотоокисление диметилсульфида (DMS), выделяемого фитопланктоном в морях (Чарльсон *et al.*, 1987) и антропогенные выбросы; последние вносят доминирующий вклад в общую нагрузку на атмосферу (Smith *et al.*, 2001).

Глобальные исследования по моделированию показывают, что вторичное образование аэрозольных частиц, инициируемое зародышеобразованием, значительно увеличивает количество аэрозолей в пограничном слое.

Повышенные концентрации количества частиц оказывают существенное влияние на CCN (и количество капель в облаке) и, следовательно, на свойства облаков (Макконен *et al.*, 2009).

Современный вклад зарождения пограничного слоя в CCN оценивается в диапазоне от нескольких процентов примерно до 50%, в зависимости от механизма образования зародышей и предполагаемого перенасыщения, необходимого для активации CCN (например, Spracklen *et al.*, 2006; Merikanto *et al.*, 2010).

В этих моделях часто применяется активация, $J = A[\text{H}_2\text{SO}_4]$ (Кулмала *et al.*, 2006), или кинетический, $J = K[\text{H}_2\text{SO}_4]^2$ (McMurry, 1980), механизм зарождения в планетарном пограничном слое

и бинарный H_2O ИТАК₄- CH_2O зарождение (Вехкамяки *et al.*, 2002) в верхних слоях тропосферы. Однако модели чувствительны к правильному описанию механизма зарождения (помимо правильного

описания процессов роста и активации CCN), и поэтому необходимо ответить на оставшиеся открытыми вопросы о зарождении в атмосфере, прежде чем можно будет надежно оценить современное антропогенное воздействие аэрозоля на радиационное воздействие и климат.

Последний Глобал-климат-модель на основе оценки вклада атмосферного ядерного-воздействия на радиационное воздействие составляет около -0.6 Вт м^{-2} (Makkonen

et al., 2012), но дальнейшая работа

требует определить это значение и оценить диапазон неопределенности.

Хотя мы не можем еще правильно оценить масштабы современной антропогенного аэрозоля эффект, в будущем может быть спроектирована, по крайней мере количественно. Диоксид серы играет важную роль в образовании зародышей в атмосфере и новых частиц, но концентрация

SO_2 находится в состоянии изменений. Глобальные антропогенные выбросы SO_2 , хотя и остаются ~ 2 прогнозируется рост в течение следующего десятилетия или двух, прогнозируется значительное снижение к 2100 году (МГЭИК, 2000). Выбросы в Европе и Северной Америке уже начали

снижаться в 1970-х, но это уменьшение до сих пор во всем мире перегружены за счет увеличения Эмиссий в Восточной Азии и других сильно развивающихся регионов мира (Смит *et al.*, 2011).

Ожидается, что в ближайшем будущем эта ситуация изменится. Поскольку SO_2 является предшественником серной кислоты, тенденции к снижению содержания H_2SO_4

также ожидаются новые уровни и, следовательно, новые скорости образования частиц. Косвенным воздействием аэрозоля на климат является охлаждение, и, климата (например, Арнет *et al.*,

2009). Из-за снижения выбросов SO_2 и последующего подавления темпов образования аэрозольных частиц

, вместе с подавлением первичных выбросов аэрозоля, общее антропогенное

воздействие аэрозоля, -1.61 Вт м^{-2} в 2000 году, по прогнозам, в

будущем значительно снизится, до -0.23 Вт м^{-2}

в 2100 году (Макконен *et al.*, 2012). Такое

изменение радиационного воздействия примерно соответствует удвоению

современного общего антропогенного радиационного воздействия ($+0.6 \text{ Вт м}^{-2}$ в 2000 году) и, безусловно, ускорил бы

потепление климата. Однако, как обсуждалось ранее, климатические модели чувствительны

к надлежащему описанию динамики частиц, включая зарождение, и

поэтому определенные выводы о будущих изменениях еще не сделаны.

Список литературы

Аалто, П., Хямери, К., Беккер, Э. *et al.* (2001) Физическая характеристика аэрозольных частиц

в бореальных лесах. *Теллус*, **53B**, 344-358.

Эйткен, Дж. (1911) Солнце как производитель тумана. *Труды Эдинбургского королевского общества*,

32, 138- 215.

- Анкилов А., Бакланов А., Колхаун М. *et al.* (2002) зависят от размера частиц ответ счетчики аэрозольных. *Исследования Атмосферы*, **63**, 209- 237.
- Арнет, А., Унгер, Н., Кулмала, М. и Андреа, М.О. (2009) Очистить воздух, обогреть планету? *Наука*, **326**, 672- 673.
- Asmi, E., Sipilä, M., Manninen, H.E. *et al.* (2009) Результаты первого аэроионного спектрометра-семинар по калибровке и взаимному сопоставлению. *Химия и физика атмосферы*, **9**, 141- 154.
- Асми Э., Фрей А., Вирккула А., Эн М., Маннинен Х.Э., Тимонен Х., О., Толонен-Кивимяки, Аурела, М., Хилламо, Р. и Кулмала, М. (2010) Гигроскопичность и химический состав антарктических субмикрометровых аэрозольных частиц и наблюдения за образованием. *Химия и физика атмосферы*, **10**, 4253 -4271, doi: 10.5194/аср-10-4253-2010. Болл С.М., Хэнсон Д.Р., Эйзел Ф.Л. и Макмарри П.Х. (1999) Лабораторные исследования раг-образование зародышей title: первоначальные результаты для H_2 ИТАК₄, CH_2 O, и NH_3 пары. *Журнал геофизических исследований*, **104** (D19), 23709 - 23718.
- Барц Х., Фиссан Х., Хелспер К. *et al* (1985) Характеристики отклика для четырех различных ядро конденсации противостоит частицам диаметром 3-50 нм. *Журнал аэрозольной науки*, **16**, 443-456. Бенсон Д. Р., Ю., Дж. Х., Маркович А. и Ли С.Х. (2011) Тройное однородное ядро-образование H_2SO_4 , NH_3 и H_2O в условиях, характерных для нижней тропосферы. *Химия и физика атмосферы*, **11**, 4755 - 4766. Berndt, T., Borge, O., Stratmann, F. *et al*(2005) Быстрое образование частиц серной кислоты при условиях, близких к атмосферным. *Наука*, **307**, 698 -700.
- Berndt, T., Stratmann, F., Sipilä, M. *et al*(2010) Лабораторное исследование новой формы частиц-тион из реакции $OH + SO_2$: влияние условий эксперимента, CH_2 O пар, NH_3 и амин трет-бутиламин влияет на общий процесс. *Химия атмосферы и физика*, **10**, 7101- 7116. Birmili, W., Berresheim, H., Plass-Dülmer, C. *et al.* (2003) Аэрозоль Хоэнпайссенберга эксперимент по образованию (HAFEX): долгосрочное исследование, включающее измерения аэрозоля с разрешением по размеру, HSO_1 , OH и монотерпенов. *Химия и физика атмосферы*, **3**, 361- 376. Бой, М., Кулмала, М., Руусканен, Т.М. *et al.* (2005) Закрытие производства серной кислоты и кон- влияние на рост частиц в режиме нуклеации. *Химия и физика атмосферы*, **5**, 863- 878. Brock, C.A., Schröder, F., Kärcher, B. *et al.* (2000) Измерение распределения ультрадисперсных частиц по размерам обнаружен в шлейфах выхлопных газов самолетов. *Журнал геофизических исследований*, **105**, 26555-26567. Чарльсон, Р.Дж., Лавлок, Дж.Э., Андреа, М.О. и Уоррен, С.Г. (1987) Океанический фито- планктон, атмосферная сера, альbedo облаков и климат. *Природа*, **326**, 655- 661.
- Чен, Д.П., Пуй, Д.Ю.Х., Хаммс, Д. *et al*(1998) Разработка и оценка нанометрового анализатор дифференциальной подвижности аэрозоля (Nano-DMA). *Научный журнал по аэрозолям*, **29**, 497-509.
- Куртиус Дж., Лавджой Э.Р. и Фройд К. Д. (2006) Образование аэрозоля, вызванное атмосферными ионами- атия. *Обзоры космической науки*, **125**, 159- 167.
- Дал Мазо, М., Кулмала, М., Рийпинен, И. *et al*(2005) Формирование и рост свежей атмосферы- сферические аэрозоли: данные о распределении аэрозолей по размерам за восемь лет, полученные в SMEAR II, Хютияля Финляндия. *Исследование бореальной среды*, **10**, 323-336.

- Ehn, M., Junninen, H., Petäjä, T. *et al.* (2010) Состав и временное поведение окружающей среды-ионы в бореальном лесу. *Химия и физика атмосферы.*, **10**, 8513-8530. doi: 10.5194/acp-10-8513-2010. Эйзель, Ф.Л. (1989) Естественные и антропогенные отрицательные ионы в тропосфере. *Журнал Геофизических исследований*, **94**, 2183-2196.
- Эйзель Ф. и Таннер Д. (1993) Измерение концентрации H_2 ИТАК₄ и метансульфоновая кислота и оценки H_2 ИТАК₄ образование и потери в атмосфере. *Журнал геофизических исследований*, **98**, 9001 -9010. Эйзел, Ф.Л. и Хэнсон, Д. Р. (2000) Первое измерение молекулярного кластера перед зарождением-*Журнал физической химии A ters.*, **104**, 830
- Фидлер В., Дал Мазо М., Бой М. (2005) Вклад серной кислоты в образование и рост атмосферных частиц: сравнение пограничных слоев в Северной и Центральной Европе. Флэган, Р. К. (1998) *Химия и физика атмосферы*, **5**, 1773- 1785.
- Флэган, Р. К. (1998) Электрические измерений аэрозоля. *Наука и технология аэрозоля*, **28**, 301- 380.
- Друг, Дж.П., Барнс, Р.А. и Васта, Р.М. (1980) Образование зародышей свободными радикалами из pho -окисление диоксида серы в воздухе. *Журнал физической химии*, **84**, 2423-2436.
- Gagné, S., Laakso, L., Petäjä, T. *et al.* (2008) Анализ данных за один год по станции SMEAR II, Финляндия. ионам-DMPS от *Tellus B*, **60**, 318 - 329.
- Gagné, S., Nieminen, T., Kurtén, T. (2010) Факторы, влияющие на вклад ионно-индуцированная нуклеация в бореальном лесу, Финляндия. *Химия и физика атмосферы*, **10**, 3743 -3757. doi: 10.5194/acp-10-3743-2010.
- Gamero-Castaño, M. and Fernández de la Mora, J. (2000) Счетчик ядер конденсации (CPC), чувствительный к однозарядным субнанометровым частицам. *Научный журнал по аэрозолям*, **31**, 757-772.
- Хансон Д.Р. и Эйзель Ф.Л. (2002) Измерение молекулярных кластеров до зарождения в Нью - Йорке, CH_2 ИТАК₄, CH_2 Операционная система. *Журнал геофизических исследований*, **107**, 4158-4174.
- Хансон Д.Р. и Лавджой Э.Р. (2006) Измерение термодинамики гидратированный димер и тример серной кислоты. *Журнал физической химии A*, **110**, 9525- 9528.
- Хари П. и Кулмала М. (2005) Станция для измерения взаимосвязей экосистем и атмосферы (МАЗОК II). *Исследование бореальной среды*, **10**, 315 -322.
- Геринг С. и Штольценбург М. (2005) Метод увеличения размера частиц водой конденсация в ламинарном термодиффузионном потоке. *Наука и технология в области аэрозолей*, **39**, 484-436.
- Хинде, В.К. (1999) *Аэрозольная технология*, John Wiley & Sons, Inc., Нью-Йорк.
- Хирсикко А., Лааксо Л., Хыррак У. *et al.* (2005) Ежегодные колебания в зависимости от размера скорости роста и концентрации ионов в бореальных лесах. *Исследование бореальной среды.*, **10**, 357-369.
- Хирсикко А., Ниёминен Т., Ганье С. *et al.* (2011) Атмосферные ионы и нуклеация: обзор наблюдений. *Химия и физика атмосферы*, **11**, 767-798.
- Хоппель, В.А. (1981) Использование дифференциальных анализаторов подвижности второго порядка для определения распределения аэрозоля по размерам. *Научный журнал по аэрозолям.*, **12**, 55-57.
- Хоппель, В.А. и Фрик, Г.М. (1986) Коэффициенты присоединения ионов и стационарное состояние распределение заряда на аэрозолях в биполярной ионной среде. *Наука и технология в области аэрозолей- нология*, **5**, 1 -21.

- Иида К., Штольценбург М., Макмарри П., Данн М.Дж., Смит Дж.Н., Эйзел Ф. и Киди, Р. (2006) Вклад ионно-индуцированной нуклеации в образование новых частиц: методология оги и ее применение к атмосферным наблюдениям в Боулдере, Колорадо, *Журнал геофизических исследований*, **111**, D23201, doi: 10.1029/2006JD007167.
- Иида К., Штольценбург М.Р., Макмарри П.Х. и Смит Дж.Н. (2008) Оценка наночастиц-скорости роста se из заряженных фракций, зависящих от размера: анализ событий образования новых частиц в Мехико, *Журнал геофизических исследований*, **113**, D05207.
- и Макмарри П.Х. (2009) Влияние рабочей жидкости на размер менее 2 нм обнаружение частиц с помощью счетчика ультрадисперсных конденсационных частиц в ламинарном потоке. *Аэрозоль Наука и технология*, **43**, 81- 96.
- МГЭИК (Межправительственная группа экспертов по изменению климата) (2000) *Сценарии выбросов: А Специальный доклад Рабочей группы II Межправительственной группы экспертов по изменению климата*, Издательство Кембриджского университета, Кембридж.
- МГЭИК (Межправительственная группа экспертов по изменению климата) (2007) *Изменение климата 2007: Основы физических наук. Резюме для директивных органов*, Секретариат МГЭИК, Женева, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/spm.html (последнее обращение 2 августа 2013 г.). Цзян Дж., Чен М., Куанг С. *et al.* (2011) Спектрометр электрической подвижности с использованием diethy-счетчик частиц конденсата лентгликоля для измерения распределения аэрозолей по размерам до 1 нм. *Наука и технология в области аэрозолей*, **45**, 510-521.
- X. *et al.* (2012) Атмосферная серная кислота и нейтральный кластерные измерения с использованием CI-API-TOF. *Химия и физика атмосферы*, **12**(9), 4117-4125.
- Junninen, H., Hulkkonen, M., Riipinen, I. *et al.* (2008) Наблюдения за ночным ростом атмосферных скоплений. *Tellus*, **60B**, 365-371.
- Junninen, H., Ehn, M., Petäjä, T. *et al.* (2010) Масс-спектрометр высокого разрешения для измерения ионного состава атмосферы. *Наука и технология в области аэрозолей*, **3**, 1039 - 1053.
- Кендлер-Шарп, А., Вильдт, Дж., ДалМасо, М. *et al.* (2009) Выбросы изопрена препятствуют появлению новых образование частиц в лесах. *Природа*, **461**, 381-384. doi: 10.1038/nature08292.
- Киркби, Дж., Куртиус, Дж., Алмейда, Дж. *et al.* Роль (2011) серной кислоты, аммиака и galac -крестики космических лучей в аэрозольной нуклеации. *Природа*, **476**, 429-433.
- Натсон Э.О. и Уитби К.Т. (1975) Классификация аэрозолей по электрической подвижности: применение-принципы, теория и приложения. *Научный журнал по аэрозолям*, **6**, 443.
- Куанг К., Макмарри П.Х., Маккормик А.В. и Эйзель Ф.Л. (2008) Зависимость ядер-влияние скоростей ионов на концентрацию паров серной кислоты в различных атмосферных условиях, *Журнал геофизических исследований*, **113**, D10209.
- Куан К., Чен М., Чжао Дж. *et al.* (2012) Измерение размера и темпов роста с учетом времени.- частицы размером от 1 до 5 нм, свежееобразованные атмосферные ядра. *Химия атмосферы и физика*, **12**, 3573- 3589. doi: 10.5194/acp-12-3573-2012.
- Kulmala, M., Toivonen, A., Mäkelä, J. and Laaksonen, A. (1998) Анализ роста частиц режима зарождения, наблюдаемых в бореальных лесах. *Теллус*, **50B**, 449-462.
- Кулмала М., Пирьола Л. и Мякеля Я.М. (2000) Стабильные сульфатные кластеры как источник новые атмосферные частицы. *Природа*, **404**, 66- 69.
- Кулмала, М. (2003) Как зарождаются и растут частицы? *Наука*, **302**, 1000- 1001.

- Kulmala, M., Vehkamäki, H., Petäjä, T. *et al.* (2004) Скорости образования и роста ультрадисперсных атмосферных частиц- обзор наблюдений. *Научный журнал по аэрозолям*, **35**, 143 - 176. Kulmala, M., Lehtinen, K.E.J., Laakso, L. *et al.* (2005) на существование нейтральной атмосферы- сферические кластеры. *Исследования Северной Природы*, **10**, 79-87.
- Kulmala, M., Lehtinen, K.E.J. and Laaksonen, A. (2006) Теория кластерной активации как объяснение линейной зависимости между скоростью образования частиц размером 3 нм и концентрацией серной кислоты. *Химия и физика атмосферы.*, **6**, 787 - 793.
- Kulmala, M., Mordas, G., Petäjä, T. *et al.* (2007) Батарея счетчика частиц конденсата (CPCB): новый инструмент для исследования активирующих свойств наночастиц. *Журнал Aerosol Science*, **38**, 289 - 304.
- Kulmala, M., Riipinen, I., Sipilä, M. *et al.* (2007) в целях прямого измерения атмосферы- сферическая нуклеации. *Наука*, **318**, 89 - 92.
- Кулмала М. и Керминен В.-М. (2008) О формировании и росте атмосферных наночастиц. *Атмосферные исследования*, **90**, 132
- Kulmala, M., Riipinen, I., Nieminen, T. *et al.* (2010) Атмосферные данные за солнечный цикл: нет связи между галактическими космическими лучами и образованием новых частиц. *Химия и физика атмосферы*, **10**, 1885 - 1898.
- Kurtén, T., Loukonen, V., Vehkamäki, H. and Kulmala, M. (2008) Амины, вероятно, будут усиливать нейтральное и ионно-индуцированное образование серной кислоты-воды в атмосфере более эффективно. *Химия и физика атмосферы*, **8**, 4095- 4103.
- Т., Куанг К., Гомес П. *et al.* (2010) Роль кластерной энергетики в- адаптация к образованию зародышей серной кислоты в атмосфере. *Журнал химической физики.*, **132**, 024304. doi: 10.1063/1.3291213.
- Kurtén, T., Petäjä, T., Smith, J. *et al.* (2011) Влияние H₂, ИТАК₄ - кластеризация аминов на масс-спектрометрия химической ионизации (CIMS) измерения серной кислоты в газовой фазе. *Химия и физика атмосферы.*, **11**, 3007-3019. Лааксо Л., Кулмала М. и Лехтинен К.Э.Дж. (2003) Эффект увеличения скорости конденсации- фактор улучшения образования частиц диаметром 3 нм при бинарном ионно-индуцированном и однородном зарождении. *Журнал геофизических исследований.*, **108**, 4574.
- Laakso, L., Gagné, S., Petäjä, T. *et al.* (2007) Определение состояния заряда сверхтонких частиц- разработка инструментов и измерение окружающей среды. *Химия атмосферы и физика*, **1333- 1345**. Laakso, L., Grönholm, T., Kulmala, L. *et al.* (2007) Воздушный шар как платформа для полета- измерения профиля атмосферного слоя во время образования частиц. *Исследование бореальной среды.*, **12**, 279-294.
- Ли С.Х., Янг Л.Х., Бенсон Д.Р., Суни Т., Кулмала М., Юннинен Х., Кампос, Т.Л., Роджерс, Округ Колумбия, и Дженсен Дж. (2008) Наблюдения за ночным образованием новых частиц в тропосфере. *Журнал геофизических исследований* 10.1029/2007JD009351. Lehtipalo, K., Sipilä, M., Riipinen, I. *et al.* (2009) Анализ атмосферных нейтральных и заряженные молекулярные кластеры в бореальном лесу с использованием CPC по высоте импульса. *Химия и физика атмосферы.*, **9**, 4177 -4184.
- Lehtipalo, K., Kulmala, M., Sipilä, M. *et al.* (2010) Наночастицы в бореальных лесах и прибрежной среде. сравнение наблюдений и последствий зарождения механизма. *Химия и физика атмосферы.*, **10**, 7009 - 7016.

- Lehtipalo, K., Sipilä, M., Junninen, J. *et al.* (2011) Наблюдения папо-CN в по-
турнал бореальный лес. *Наука и технология в области аэрозолей*, **45**, 499-509.
- Leppä, J., Anttila, T., Kerminen, V.-M. *et al.* (2011) Образование новых частиц в атмосфере:
реальный и кажущийся рост нейтральных и заряженных частиц. *Химия
атмосферы и физика*, **11**, 4939- 4955. doi: 10.5194 / asr-11-4939-2011. Лю, Б.
Я.Х. и Пуи, Д.Я.Х. (1974) Субмикронный стандарт аэрозоля и первичный абсолютный
калибровка счетчика ядер конденсации. *Журнал науки о коллоидах и интерфейсах*,
47, 155-171. Лю,
Б.Я.Х. и Ким, К.С. (1977) Об эффективности подсчета количества ядер конденсации-
ters. *Атмосферная среда*, **11**, 1097- 1100.
- Mäkelä, J.M., Yli-Koivisto, S., Hiltunen, V. (2001) Химический состав аэрозолей *al*
во время событий образования частиц в *, 53*, 380-393. *Теллус Б*
бореальных лесах. Макконен Р., Асми А., Корхонен Х. *et al* . (2009) Чувствительность концентраций аэрозоля
и свойств облаков к образованию зародышей и вторичному
распределению органических веществ в модели *Химия и физика атмосферы*, **9**, 1747-1766.
- Макконен Р., Асми А., Керминен В.-М., Бой М., Арнет А., Хари П. и Кулмала,
М. (2012) Контроль загрязнения воздуха и уменьшение образования новых
частиц приводят к сильному потеплению. *Химия и физика атмосферы*, **12**, 1515 - 1524.
- Nieminen, T., Riipinen I. *et al* . (2009) Заряженная и полная частица для-
динамика и темпы роста во время кампании EUCAARI 2007 в Хютияля. *Химия
и физика атмосферы*, **9**, 4077 - 4089. Manninen,
H.E., Nieminen, T., Asmi, E. *et al.* (2010) Ионный спектрометр EUCAARI mea-
гарантии на 12 европейских объектах - анализ событий образования новых частиц. *Химия
и физика атмосферы*, **10**, 7907-7927.
- Маннинен, Х.Э., Франчин, А., Шобесбергер, С. *et al.* (2011) Характеристика короны-
генерируемые ионы, используемые в спектрометре нейтральных кластеров и аэроионов (NAIS). *Обсуждение
атмосферных методов измерения*, **4**, 2099-2125.
- МакМерри, П.Х. (1980) Образование фотохимического аэрозоля из SO₂ : теоретический анализ
из данных камеры смога. *Журнал науки о коллоидах и интерфейсах*, **78**, 513- 527.
- Макмерри, П.Х. (2000) История СРС. *Наука и технология аэрозолей*, **33**, 297-322.
- Макмарри П.Х., Кулмала М. и Уорсноп Д.Р. (2011) Специальный выпуск по аэрозольным измерениям-
улучшения в диапазоне 1 нм. *Наука и технология аэрозолей*, **45**, 1.
- Ментель Т.Ф., Вильдт Дж., Кендлер-Шарп А. *et al.* (2009) Фотохимическое производство
аэрозолей из реальных выбросов растений. *Химия и физика атмосферы*, **9**, 4387-4406.
- Мериканто Дж., Спраклен Д.В., Прингл К.Дж. и Карслоу К.С. (2010) Влияние образования
частиц пограничного слоя на количество облачных капель и изменения альbedo облаков с 1850 г.
до 2000 года. *Химия и физика атмосферы*, **10**, 695 - 705.
- Metzger, A., Verheggen, B., Dommen, J. *et al.* (2010) Доказательства роли органических веществ в
образовании аэрозольных частиц в атмосферных условиях. *Труды
Национальной академии наук*. doi: 10.1073/pnas.0911330107. Мирабель
П. и Кац Дж.Л. (1974) Бинарное гомогенное зарождение как механизм для
образование аэрозолей. *Журнал химической физики*, **60**, 1138 -1144.
- Мирме, А., Тамм, Э., Мордас, Г. *et al.* (2007) Многоканальный аэроионный спектрометр широкого диапазона.-
Тромметр. *Исследование бореальной среды*, **12**, 247 -264.
- Мирме, С., Мирме, А., Миникин, А. *et al.* (2010) Атмосферные частицы размером менее 3 нм на больших высотах
. *Химия и физика атмосферы*, **10**, 437-451.

- Mordas, G., Kulmala, M., Petäjä, T., Aalto, P.P., Matulevicius, V., Grigoraitis, V., Ulevicius, B., Grauslys B., Ukkonen, A., и Hämeri, K. (2005) дизайн и производительность характеристик конденсационный счетчик частиц, УФ-02proto, *Исследование Бореальной окружающей среды*, **10**, 543- 552.
- Mäkelä, J.M., Aalto, P.P., Jokinen, V. *et al.* (1997) Наблюдения за ультрадисперсными аэрозольными частицами образование и рост в бореальных лесах. *Письма о геофизических исследованиях*, **24**, 1219- 1222.
- Mönnkönen, P., Koronen, I.K., Lehtinen, K. *et al.* (2005) Измерения в условиях высокой полярности. - мегаполис в Южной Азии: наблюдения за распределением количества аэрозолей по размерам, модальными параметрами и событиями зарождения. *Химия и физика атмосферы*, **57**, 566- 575.
- Nieminen, T., Manninen, H., Sihto, S.-L. *et al.* (2009) Соединение серной кислоты с зародки атмосферы в бореальных лесах. *Наука и технологии в области охраны окружающей среды*, **43**, 4715- 4721.
- Ниеминен Т., Лехтинен К. Э.Дж. и Кулмала М. (2010) О конденсационном росте кластеров и наночастиц в диапазоне размеров менее 10 нм. *Обсуждения по химии и физике атмосферы*, **10**, 1693-1717.
- О'Дауд, К.Д., Аалто, П., Хямери, К. *et al.* (2002) Атмосферные частицы из органических веществ пары. *Природа*, **416**, 497-498.
- O'Dowd, C.D., Hämeri, K., Mäkelä, J.M. *et al.* (2002) Образование прибрежных новых частиц: условия окружающей среды и физико-химические характеристики аэрозоля во время зарождения всплеск. *Журнал геофизических исследований*, **107**(D19), 8107. doi: 10.1029/2000JD000206.
- О'Дауд, К.Д., Хименес, Дж.Л., Бахрейни, Р. *et al.* (2002) Образование морского аэрозоля в результате биогенных выбросов йода. *Природа*, **417**, 632 - 636.
- О'Дауд, К.Д., Аалто, П.П., Юн, Ю.Дж. и Хамери, К. (2004) Использование высоты пульса анализатор счетчика частиц ультрамелкой конденсации (PNA-UCPC), применяемый для определения частиц различного химического состава в режиме зарождения. *Журнал аэрозольной науки*, **35**, 205-216.
- О'Дауд, К.Д., Юн, Ю.Дж., Юнкерман, У. *et al.* (2007) Измерения ядерных частиц в воздухе- частицы первого типа: зарождение и темпы роста в прибрежных районах. *Химия атмосферы и физика*, **7**, 1491- 1501.
- Raasonen, P., Nieminen, T., Asmi, E. *et al.* (2010) О роли серной кислоты и низкого-летучесть органических паров при образовании новых частиц на четырех европейских площадках для измерений. *Химия и физика атмосферы*, **10**, 11223 - 11242.
- Пеннер Дж.Э., Куаас Дж., Сторелвмо Т. *et al.* (2006) Сопоставление моделей косвенных аэрозольные эффекты. *Химия и физика атмосферы*, **6**, 3391 -3405.
- Petäjä, T., Mordas, G., Manninen, H. *et al.* (2006) Эффективность обнаружения TSI на водной основе счетчик частиц конденсата 3785. *Наука и технология аэрозолей*, **40**, 1090- 1097.
- Петая, Т., Маулдин, Р.Л. III, Костюх, Э. *et al.* (2009) Концентрация серной кислоты и OH-изменения на участке бореального леса. *Химия и физика атмосферы*, **9**, 7435-7448.
- Petäjä, T., Sipilä, M., Paasonen, P. *et al.* (2011) Экспериментальное наблюдение сильно связанной димеры серной кислоты: применение для образования зародышей в атмосфере. *Physical Review Письма*, **106**, 228302.
- Раманатан В., Крутцен П.Дж., Киль Дж.Т. и Розенфельд Д. (2001) Аэрозоль, климат и гидрологический цикл. *Наука*, **294**, 2119 - 2124.
- Рейшль Г.П., Мякеля Дж.М. и Неджид Дж. (1997) Характеристики дифференциала венского типа анализатор подвижности при 1,2 -20 нанометрах. *Наука и технология в области аэрозолей*, **27**, 651 - 672.

- Riipinen, I., Manninen, H., Yli-Juuti, T. *et al.* (2009) Нанесение частиц конденсата Батарея счетчиков (CPCB) для изучения сродства к воде свежесформированных частиц размером 2-9 нм в бореальных лесах. *Химия и физика атмосферы.*, **9**, 3317-3330. Рийпинен И., Пирс Дж.Р., Илиюти Т., *et al.* (2011) Органическая конденсация: жизненно важное звено в- влияние образования аэрозоля на концентрацию ядер конденсации облаков (CCN). *Химия и физика атмосферы.*, **11**(8), 3865-3878. doi: 10.5194/аср-11-3865-2011.
- Россер С. и Фернандес де ла Мора Дж. (2005) DMA венского типа с высоким разрешением и высокая скорость потока. *Наука и технология в области аэрозолей*, **39**, 1191 - 1200.
- Розенфельд, Д. (2000) Подавление дождя и снега из-за загрязнения воздуха в городах и на производстве. *Наука*, **287**, 1793 -1796.
- Розенфельд Д., Ломанн У., Рага Г.Б. *et al.* (2008) Наводнение или засуха: как аэрозоли *et* влияют ли осадки? *Наука* *al*, **321**, 1309 - 1313.
- Сарос М., Вебер Р.Дж., Марти Дж. и Макмерри П.Х. (1996) Измерение сверхтонкого аэрозоля использование счетчика ядер конденсации с анализом высоты импульса. *Наука об аэрозолях и технология*, **25**, 200-213.
- Сайнфелд, Дж.Х. и Пандис, С.Н. (2006) *Химия и физика атмосферы: от Air Pol- влияние на изменение климата.*, John Wiley & Sons, Inc., Нью-Йорк.
- Сето Т., Окуяма К., де Хуан Л. и Фернандес де ла Мора Дж. (1997) Конденсация пересыщенных паров на одновалентных и двухвалентных ионах различного размера. *Журнал химической физики*, **107**, 1576 -1585.
- Sihto, S.-L., Kulmala, M., Kerminen, V.-M. *et al.* (2006) Атмосферная серная кислота и образование аэрозоля: результаты атмосферных измерений для определения процессов зарождения и механизмов раннего роста. *Химия и физика атмосферы.*, **6**, 4079 - 4091.
- Sipilä, M., Lehtipalo, K., Kulmala, M. *et al.* (2008) Применимость конденсационного паритета- счетчики времени для обнаружения атмосферных скоплений. *Химия и физика атмосферы.*, **8**, 4049 -4060.
- Sipilä, M., Lehtipalo, K., Attoui, M. *et al.* (2009) Лабораторная проверка PH-CPC способность отслеживать атмосферные скопления размером менее 3 нм. *Наука и технология в области аэрозолей*, **43**, 126- 135.
- Sipilä, M., Berndt, T., Petäjä, T. *et al.* (2010) Роль серной кислоты в атмосферных зарождение. *Наука*, **327**, 1243-1246.
- Смит, Дж.Н., Данн, М.Дж., ВанРекен, Т.М., Иида, К., Штольценбург, М.Р., Макмерри, П.Х., и Нуе, L.G. (2008) Химический состав атмосферных наночастиц, образовавшихся в результате зарождения в Текамаке, Мексика: доказательства важной роли органических видов в росте наночастиц, *Письма о геофизических исследованиях*, **35**, L04808, doi: 10.1029/2007GL032523.
- Смит Дж.Н., Барсанти К.К., Фридли Х.Р. *et al.* (2010) Наблюдения за солями аминия в области атмосферных наночастиц и возможных климатических последствий. *Труды Национальной академии наук*, **107**, 6634-6639.
- Смит С.Дж., Питчер Х. и Уигли Т.М.Л. (2001) Глобальный и региональный антропогенный вред- выбросы двуокси углерода. *Глобальные и планетарные изменения*, **29**, 99- 119.
- Смит, С.Дж., ван Арденн, Дж., Климонт, З. *et al.* (2011) Антропогенные выбросы диоксида серы- периоды: 1850-2005гг. *Химия и физика атмосферы.*, **11**, 1101 - 1116.
- Сорокин А. и Арнольд Ф. (2007) Лабораторное исследование образования кластерных ионов в Система H2SO4-H2O: влияние на пороговую концентрацию газообразного H2SO4 и кинетика ионно-индуцированного образования зародышей. *Атмосферная среда.*, **41**, 3740- 3747.

- Спраклен, Д. В., Карслоу, К.С., Кулмала, М. *et al.* (2006) Вклад пограничных влияние событий зарождения слоев на общую концентрацию частиц в региональном и глобальном масштабах. *Химия и физика атмосферы*, **6**, 5631-5648.
- Штайнер Г., Аттуи М., Виммер Д. и Рейшль Г.П. (2010) Средний расход, высокая-разрешение Vienna DMA, работающее в режиме рециркуляции. *Наука об аэрозолях и технология*, **44**, 308-315.
- Штольценбург М.Р. (1988) Система измерения распределения ультрадисперсных аэрозолей по размерам. Кандидатская диссертация. Факультет машиностроения, Университет Миннесоты, Миннеаполис.
- Штольценбург, М.Р. и Макмерри, П.Х. (1991) Ультрадисперсное ядро конденсации аэрозоля счетчик. *Наука и технология аэрозоля*, **14**, 48-65.
- Штольценбург, М.Р. и Макмерри, П.Х. (2008) Уравнения, управляющие одиночными и tandemными Конфигурации DMA и новое логнормальное приближение к передаточной функции. *Наука и технология в области аэрозолей*, **42**, 421 -432.
- Сунни Т., Кулмала М., Хирсикко А. *et al.* (2008) Образование и характеристики ионов и заряженные аэрозольные частицы в эвкалиптовом лесу Австралии. *Химия атмосферы и физика*, **8**, 129 - 139.
- Torro, L., Kurtén, T., Vehkamäki, H. *et al.* (2007) Значение аммиака в атмосферном воздухе нанокластеры. *Журнал физической химии А*, **111**, 10671 - 10674.
- Туми, С. (1974) Загрязнение и альбедо планеты. *Атмосферная среда*, **8**, 1251- 1256.
- Vakkari, V., Laakso, H., Kulmala, M. *et al.* (2011) новые события образование частиц в полустылые Южной Африканской саванны. *Химия и физика атмосферы*, **11**, 3333-3346. doi: 10.5194/acp-11-3333-2011.
- Vanhanen, J., Mikkilä, J., Lehtipalo, K. *et al.* (2011) Увеличитель размера частиц для обнаружения папо-CN. *Наука и технология аэрозолей*, **45**, 533 - 542.
- Vehkamäki, H., Kulmala, M., Napari, J. *et al.* (2002) Улучшенная параметризация для скорости образования зародышей фуриевой кислоты и воды в условиях тропосферы и стратосферы. *Журнал геофизических исследований*, **107**, 4622- 4632.
- Vehkamäki, H., Dal Maso, M., Hussein, T. *et al.* (2004) Образование атмосферных частиц события на измерительной станции Вяррио в финской Лапландии, 1998-2002. *Химия и физика атмосферы*, **4**, 2015-2023.
- Вензак Х., Селлегри К. и Ладж П. (2007) События зарождения, обнаруженные на большой высоте площадка исследовательской станции Пюи-де-Дом, Франция. *Исследование бореальной среды*, **12**, 345 - 359.
- Виисанен Ю., Кулмала М. и Лааксонен А. (1997) Эксперименты по газожидкостному зарождению о серной кислоте и воде. *Журнал химической физики*, **107**, 920 - 926.
- Вебер, Р.Дж., Макмерри, П.Х., Эйзел, Ф.Л. и Таннер, Д.Дж. (1995) Измерение ожидаемого виды предшественников зарождения и частицы диаметром 3-500 нм в обсерватории Мауна-Лоа на Гавайях. *Журнал атмосферных наук*, **52**, 2242-2257.
- Вебер, Р.Дж., Марти, Дж.Дж., Макмерри, П.Х. *et al.* (1996) Измерил скорость образования новых частиц в атмосфере значение для механизмов зарождения. *Коммуникации в области химического машиностроения*, **151**, 53 -64.
- Вебер, Р.Дж., Марти, Дж.Дж., Макмерри, П.Х. *et al.* (1997) Измерения образования новых частиц- скорости роста ультрадисперсных частиц на чистом континентальном участке. *Журнал геофизических исследований*, **102**, 4375-4385.

- Венер Б., Виденсолер А., Туч Т.М., Ву З.Дж., Ху М., Сланина Дж., Кнанг К.С. (2004) Изменчивость распределения количества аэрозолей по размерам в Пекине, Китай: новое образование частиц, пыльные бури и высокий континентальный фон, *Письма о геофизических исследованиях*, **31**, L22109, doi: 10.1029/2004GL021596.
- Wehner, B., Petäjä, T., Boy, M., Engler, C., Birmili, W., Tuch, T., Wiedensohler, A., and Kulmala, M. (2005) Влияние серной кислоты и нелетучих соединений на рост свежесформированных атмосферных аэрозолей, *Письма о геофизических исследованиях*, **32**, L17810, doi: 10.1029/2005GL023827.
- Вельц, О., Сэви, Дж.Д., Осборн, Д.Л. *et al.* (2012) Прямые кинетические измерения Стгеее Промежуточные (H_2O) образуются в результате реакции CH_2I с помощью O_2 . *Наука*, **335**, 204–207.
- Виденсолер А., Ханссон Х.-К., Орсини Д. *et al.* (1997) Формирование и возникновение в ночное время- появление новых частиц, связанных с орографическими облаками. *Атмосферная среда*, **16**, 2545–2559. Виденсолер, А., Бирмили, В., Новак, А. *et al.* (2012) Спектрометры подвижных частиц по размерам- показатели: гармонизация технических стандартов и структуры данных для обеспечения высокого качества долгосрочных наблюдений за распределением количества частиц по размерам в атмосфере. *Методы измерения атмосферных*, **5**, 657–685. doi: 10.5194/amt-5-657-2012.
- Винклер П.М., Штайнер Г., Вртала А. *et al.* (2008) Эксперименты по гетерогенной нуклеации- позволяют перейти от кластеров молекулярных ионов к наночастицам. *Наука*, **319**, 1374–1377. Винклмайр В., Рейшль Г.П., Линднер А.О. и Бернер А. (1991) Новая электрообильность спектрометр для измерения распределения аэрозолей по размерам в диапазоне размеров от 1 до 1000 нм. *Научный журнал по аэрозолям*, **22**, 289–296.
- Yli-Juuti, T., Nieminen, T., Hirsikko, A. *et al.* (2011) Темпы роста режима зарождения частицы в Хютияля в 2003–2009 годах: различия в зависимости от размера частиц, сезона года, данных метода анализа и условий окружающей среды. *Химия и физика атмосферы*, **11**, 12865–12886. doi: 10.5194/acp-11-12865-2011.
- Юн, Ю.Дж., О’Дэуд К.Д., Дженинге С.Г. и Ли С.Х. (2006) Статистические характеристики и предсказуемость событий образования частиц в головке булав, *Журнал геофизических исследований*, **111**, D13204, doi: 10.1029/2005JD006284. Янг, Л.Х., Бенсон, Д.Р., Камил, Ф.Р. *et al.* (2008) Лабораторные исследования H_2 ИТАК₄ / CH_2O бинарное гомогенное зарождение из SO_2 Реакция +ОН: оценка экспериментальной установки и предварительные результаты. *Химия и физика атмосферы*, **8**, 4997–5016. Ю. Ф. и Турко Р.П. (2008) Тематические исследования событий образования частиц, наблюдаемых в бореальных лесах леса: последствия для механизмов зарождения. *Химия и физика атмосферы*, **8**, 6085–6102. Ю, Ф., Ван, З., Ло, Г. и Турко, Р.П. (2008) Ионно-опосредованная нуклеация как важный источник тропосферных аэрозолей. *Химия и физика атмосферы*, **8**, 2537–2554. Ю, Ф. (2010) Ионноопосредованная нуклеация в атмосфере: ключевые управляющие параметры, выводы и справочная таблица, *Журнал геофизических исследований*, **115**, D03206.
- Ю, Х., Макгроу, Р. и Ли, С.-Х. (2012) Влияние аминов на образование суб3 нм частицы и их последующий рост, *Письма о геофизических исследованиях*, **39**, L02807, doi: 10.1029/2011GL050099.
- Чжан Р., Су И., Чжао Дж. *et al.* (2004) Образование новых частиц в атмосфере усиливается за счет органических кислот. *Наука*, **304**, 1487–1490.

- Чжао Дж., Эйзел Ф.Л., Титкомб М., Куанг К. Г. и Макмарри П.Х. (2010) Химия-ионизационные масс-спектрометрические измерения атмосферных нейтральных кластеров с использованием cluster-CIMS. *Журнал геофизических исследований*, **115**, D08205, doi: 10.1029/2009JD012606. Чжао Дж., Смит Дж.Н., Эйзел Ф.Л. *et al.* (2011) Наблюдение нейтрального амина серной кислоты содержащих кластеры в лабораторных условиях и при измерениях окружающей среды. *Химия атмосферы и физика*, **11**, 10823-10836.

Атмосферные аэрозоли и климат

Воздействие

Мария Канакиду

*Лаборатория химических процессов в окружающей среде, химический факультет,
Критский университет, Греция*

8.1 Введение

Атмосферные аэрозоли представляют собой сложные ансамбли твердых или жидких атмосферных материалов различного химического состава и размера, которые связаны с переменным количеством воды в зависимости от атмосферных условий и их гигроскопичности. Аэрозоли ставят под угрозу здоровье человека и экосистемы, влияют на видимость и, следовательно, на деятельность человека, воздействуют на озон и глобальный радиационный баланс, изменяют свойства облаков и приводят к обратным связям в гидрологическом цикле и климатических возмущениях, поскольку они взаимодействуют как со светом (в видимом и ближнем инфракрасном спектре), так и с атмосферной водой.

8.2 Глобальное распределение аэрозолей

Концентрации аэрозолей в атмосфере являются результатом выбросов в атмосферу, образования в ней и удаления из атмосферы, а также переноса и физико-химических преобразований. Источники аэрозоля бывают как природными, так и антропогенными. Антропогенные источники аэрозолей включают сжигание фос- силикатного топлива и биотоплива для производства энергии, промышленной деятельности и транспортировки (наземной, морской и авиационной), повторное взвешивание пыли при наземном транспорте и другую деятельность человека. Субмикронные аэрозоли могут непосредственно выбрасываться в атмосферу, главным образом антропогенными источниками (в основном источниками горения). Источниками большой неопределенности являются

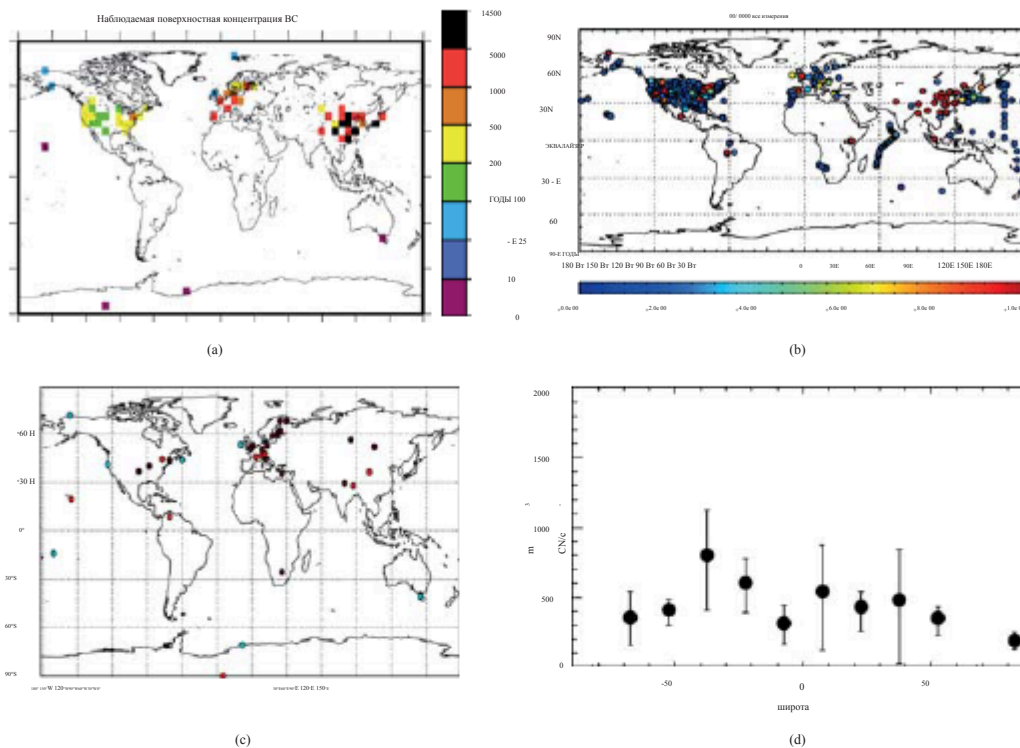
природные аэрозоли содержат морскую соль, пыль, морской органический аэрозоль, растительные остатки и первичные биогенные частицы, включая споры, вирусы и микробы. В основном это крупнозернистые аэрозоли (диаметром более 2,5 мкм). Спорадические извержения вулканов также являются значительными источниками аэрозолей или их газообразных предшественников в атмосфере. Природные аэрозоли из морской и наземной биосферы потенциально могут представлять собой механизм обратной связи, связывающий морскую и наземную биосферу и атмосферу.

Вторичные аэрозоли могут образовываться в атмосфере в результате образования зародышей паров и увеличиваться до размеров по Эйткуэну (диаметр 0,01 - 0,1 мкм) и накопления (0,1-1,0 мкм) за счет **коагуляции** с другими частицами или/и **конденсации** паров на их поверхностях. Существует конкуренция между коагуляцией и конденсацией за особые условия для контроля времени оборота аэрозоля (подробнее см. В Kanakidou *et al.*, 2005a); то есть время, необходимое для e -кратного снижения концентрации аэрозоля в атмосфере. Таким образом, существуют области, в которых время обращения аэрозоля контролируется коагуляцией, и другие, в которых оно контролируется конденсацией растворимых паров. **Обработка облаков** также влияет на аэрозоли. Облачные капли могут поглощать растворимые газы, например CO_2 и глиоксаль (ЧОЧО) которые окисляются в каплях, тем самым увеличивая "остаточную" массу и размер аэрозоля при испарении капель (Мириокефалитакис *et al.*, 2011). В свою очередь, облачные капли могут образовываться из аэрозолей (**ядер конденсации**, CNs) выше критического порогового размера, которые активируются (следуют за неограниченным ростом за счет конденсации воды) в условиях высокой относительной влажности (RH). Понимание и моделирование вторичного аэрозольного образования в атмосфере и их взаимодействия с атмосферной водой остается сложной задачей для научного сообщества и моделирования переноса химических веществ в атмосфере.

За последние 15 лет, целенаправленные полевые кампании позволили получить подробные характеристики региональных аэрозольных, химических, микрофизических и радиационных свойств, а также соответствующих условий на поверхности и в атмосфере. Исследования, проведенные в ходе этих кампаний, позволяют получить очень надежные характеристики субмикронных сферических частиц, таких как сульфатный аэрозоль. *In situ* характеристика более крупных частиц, таких как пыль, гораздо менее надежна (Подбородок *et al.*, 2009). Рисунки 8.1a,b дают общее представление о приземных концентрациях углеродсодержащих аэрозолей (черный углерод, BC, от Koch *et al.* (2009) и органический углерод, OC, из Цигаридиса *et al.* (2013)). На рисунке 8.1c показаны местоположения наблюдений концентрации CN, составленные Хайнценбергом, Ковертом и Ван Дингененом (2000) и изображенные Spracklen *et al.* (2011). Обобщенное широтное распределение наблюдаемых уровней CN приведено на рисунке 8.1d. Эти цифры четко показывают более высокие уровни, зарегистрированные над загрязненными континентальными районами. Они также показывают, что сеть наблюдений смещена в сторону северного полушария (NH). Существует явная потребность в получении дополнительных данных о тропиках, континентальных районах южного полушария (SH) и отдаленных районах, чтобы дополнить глобальную картину этих компонентов аэрозоля и распределения их численности. Таким образом, в настоящее время глобальные модели представляют собой уникальные инструменты, которые дают краткую картину глобального распределения компонентов и характеристик аэрозоля и, таким образом, позволяют оценить их воздействие.

8.3 Воздействие аэрозоля на Климат

Ослабление света от атмосферных аэрозолей в результате многократного рассеяния и/или поглощения солнечной радиации снижает видимость в атмосфере и вызывает серьезные проблемы с переносом, а также вызывает так называемый прямой климатический эффект аэрозоля. Таким образом, мы



(a) Нанограммы наблюдения поверхности ВС на кубический метр. Воспроизведено с помощью rer- Рисунок

8.1 миссия от Koch et al., 2009. Авторское право © 2009, Koch et al. (b) Поверхностные наблюдения ОС в микрограммах на кубический метр. Воспроизведено с разрешения Цигардиса. et al. 2013. Авторское право © 2013, Цигардис et al. и ссылки в нем. (c) Местоположения наблюдений CN. (d)

Широтное распределение наблюдений за концентрацией CN в кубических сантиметрах. Воспроизведено с разрешения Spracklen et al., 2010. Авторское право © 2010, Spracklen et al Рисунок (c)

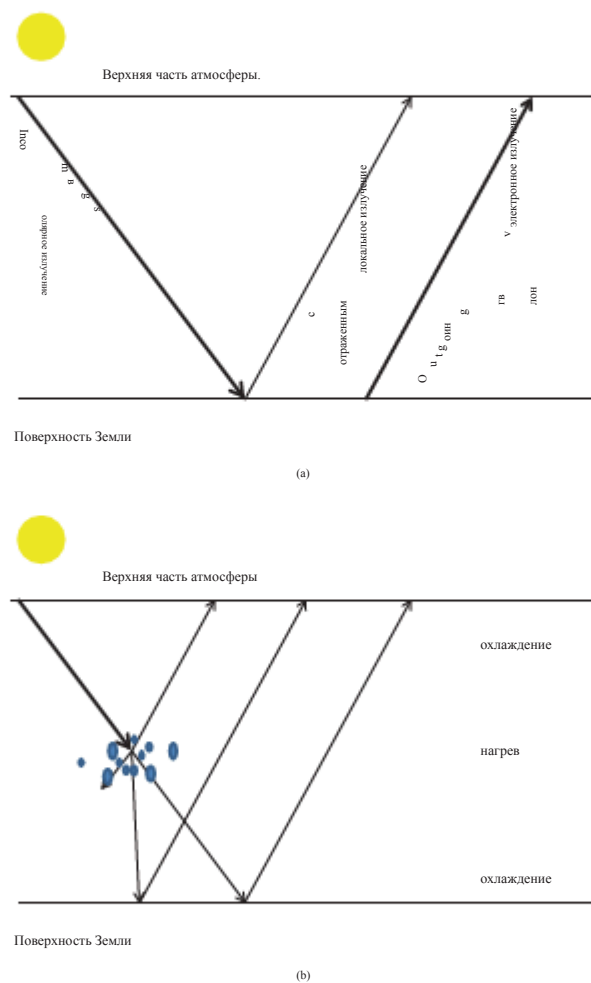
и (d) адаптированы из Spracklen. et al. (2010) на основе данных, собранных Хайнценбергом et al. (2000). Цветовое исполнение смотрите в разделе "Таблица".

определите изменение энергетического баланса атмосферы из-за поглощения аэрозолями в качестве по сравнению с "неаэрозольной" атмосферой.

Система Земля/ атмосфера постоянно получает солнечное излучение (коротковолновое и ближнее инфракрасное). Небольшая часть этого поступающего солнечного излучения отражается на поверхности Земли и, таким образом, непосредственно выбрасывается в космос; остальная часть поглощается землей. Кроме того, длинноволновое (инфракрасное) излучение испускается с поверхности Земли и уходит в космос из верхних слоев атмосферы (рис. 8.2а, при условии отсутствия какого-либо поглощающего или рассеивающего материала в атмосфере). Баланс между входящим и исходящим излучением контролирует температуру земли, а поглощающий и рассеивающий материал в атмосфере влияет на этот баланс. Многократное рассеяние излучения атмосферными аэрозолями уменьшает поступающее солнечное излучение, достигающее поверхности Земли, и увеличивает излучение, выходящее из верхних слоев атмосферы, таким образом охлаждая систему земля/атмосфера (рис. 8.2б). Таким образом, рассеивающие компоненты аэрозоля оказывают эффект, противоположный эффекту парниковых газов на глобальную температуру атмосферы, замедляя потепление климата (Форстер *et al.*, 2007). С другой стороны, поглощающие аэрозоли, такие как ВС и пыль, улавливают излучение и нагревают атмосферный слой, в котором они находятся, изменяя

динамическая стабильность атмосферы. Все типы аэрозолей уменьшают излучение, достигающее поверхности, что приводит к ее охлаждению.

Атмосферные аэрозоли также косвенно влияют на климат, изменяя количество облаков, микрофизические и радиационные свойства (так называемый эффект альbedo облаков или первый косвенный эффект) и эффективность выпадения осадков (так называемый эффект продолжительности жизни облаков или второй косвенный эффект), а также гидрологический цикл в целом (рис. 8.2 с). Таким образом, при фиксированном содержании воды в жидкости увеличение количества аэрозолей приводит к образованию большего количества капель, но меньшего размера (Twomey, 1974). Кроме того, увеличение количества облачных капель и уменьшение их размера увеличивает толщину облака и площадь поверхности капель, контактирующей с окружающим воздухом.



а) Входящее солнечное излучение, отраженное от поверхности Земли как исходящее солнечное излучение **Рисунок 8.2** радиация и исходящее длинноволновое излучение от земли при отсутствии аэрозолей и газов в атмосфере (прозрачная атмосфера). (b) Атмосфера с аэрозолями и их прямое воздействие на солнечную радиацию. (с) косвенное воздействие аэрозолей на климат в чистой и загрязненной атмосфере. d) оценки радиационного воздействия (1750-2000 годы), полученные Форстером et al. (2007). Воспроизведено с разрешения IPCC 2007. Авторское право © 2007, МГЭИК. Цветную версию см. в разделе "Табличка".

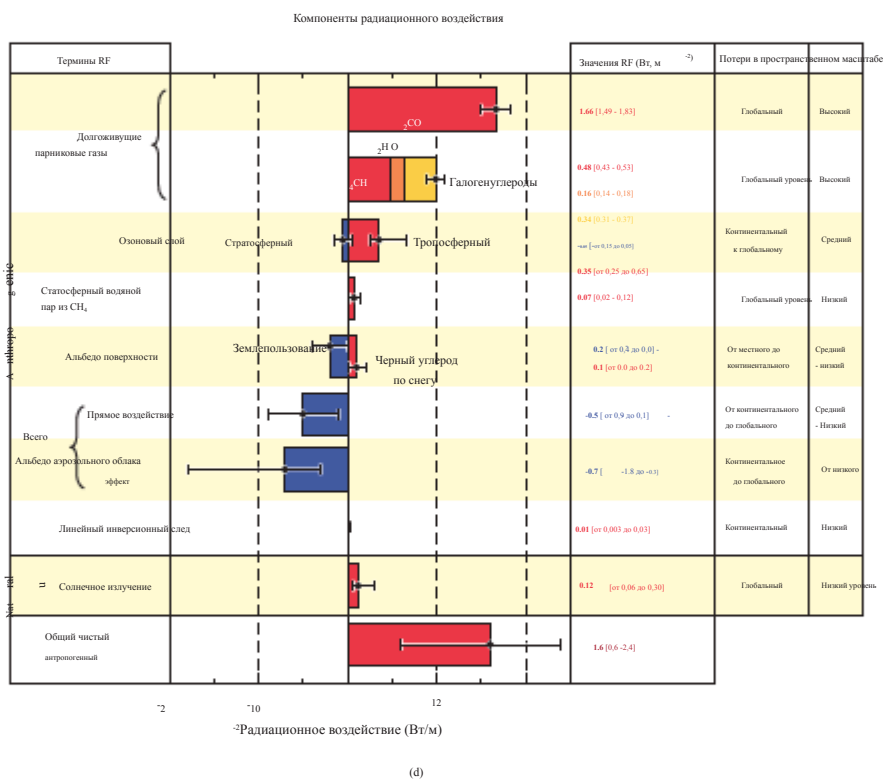
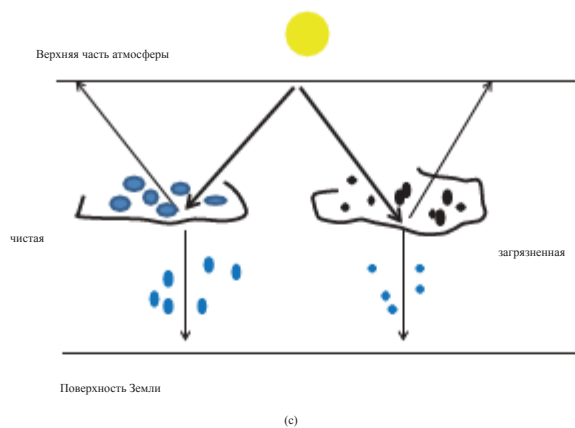
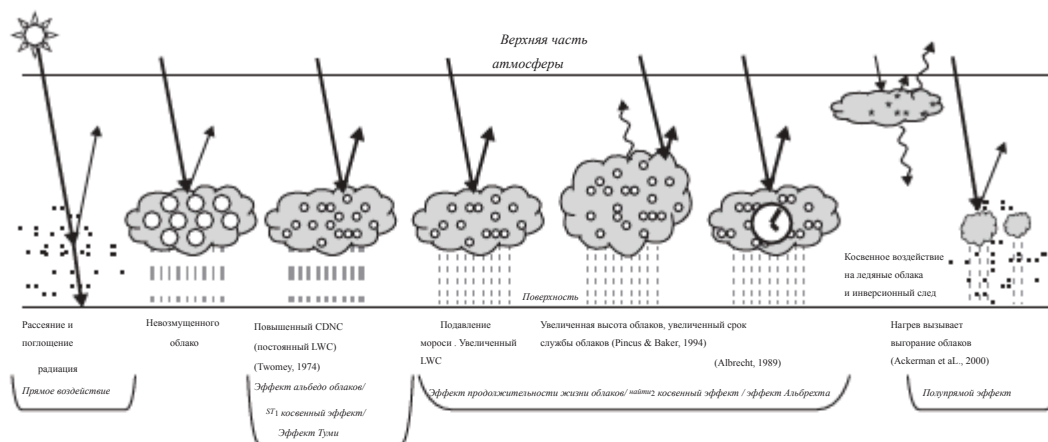


Рисунок 8.2 (продолжение)

Таким образом, это способствует испарению и увеличивает количество циклов испарения / конденсации, через которые проходит облако, прежде чем оно окончательно выпадет в осадок, изменяя срок службы облака (Альбрехт, 1989) (рис. 8.3). Кроме того, нагрев тропосферы из-за поглощения коротковолнового излучения тропосферными аэрозолями (например, ВС, рис. 8.2b) изменяет относительную влажность и стабильность тропосферы и, таким образом, влияет на образование облаков и продолжительность их существования, вызывая так называемый "полупрямой" эффект аэрозолей (рис. 8.3). Аэрозоли также влияют на климат, влияя на количество озона, который является парниковым газом, поскольку на поверхности аэрозоля и в жидких частицах аэрозоля происходят гетерогенные реакции, а на скорость фотолиза влияют изменения радиации, вызванные присутствием аэрозолей.



Принципиальная схема, показывающая различные механизмы излучения, связанные с ним **Рисунок**

8.3 эффекты облачности, которые были определены как существенные по отношению к аэрозолям. Изменено по Хейвуду и Буше (2000). Маленькие черные точки представляют аэрозольные частицы; более крупные открытые круги - облачные капли. Прямые линии представляют падающее и отраженное солнечное излучение, а волнистые линии представляют земное излучение. Закрашенные белые кружочки указывают на количество облачных капель в концентрации (CDNC). Невозмущенное облако содержит более крупные облачные капли, поскольку только природные аэрозоли доступны в виде ядер конденсации облаков (CCN), в то время как возмущенное облако содержит большее количество более мелких облачных капель, поскольку как природные, так и антропогенные аэрозоли доступны в виде CCN. Вертикальные серые черточки обозначают количество осадков, а "LWC" относится к жидкому содержанию воды. Воспроизведено с разрешения IPCC 2007. Авторское право © 2007, IPCC. Рис. 2.10 от Форстера et al. (2007).

Исходя из концентрации аэрозолей с разбивкой по размерам, можно рассчитать ослабление излучения, а также концентрации ядер конденсации облаков (CCNs), которые возникают в результате роста мелких атмосферных аэрозолей до критических размеров. Однако, хотя существует консенсус в отношении того, что аэрозоли оказывают охлаждающее действие на климат Земли (рис. 8.2d; Форстер et al., 2007), фактическое состояние знаний о глобальном воздействии аэрозоля на климат очень неопределенно, что показано столбиками, связанными с оценками прямого и косвенного воздействия аэрозоля на аэрозоль на рисунке 8.2d.

8.4 Моделирование глобального распределения аэрозоля

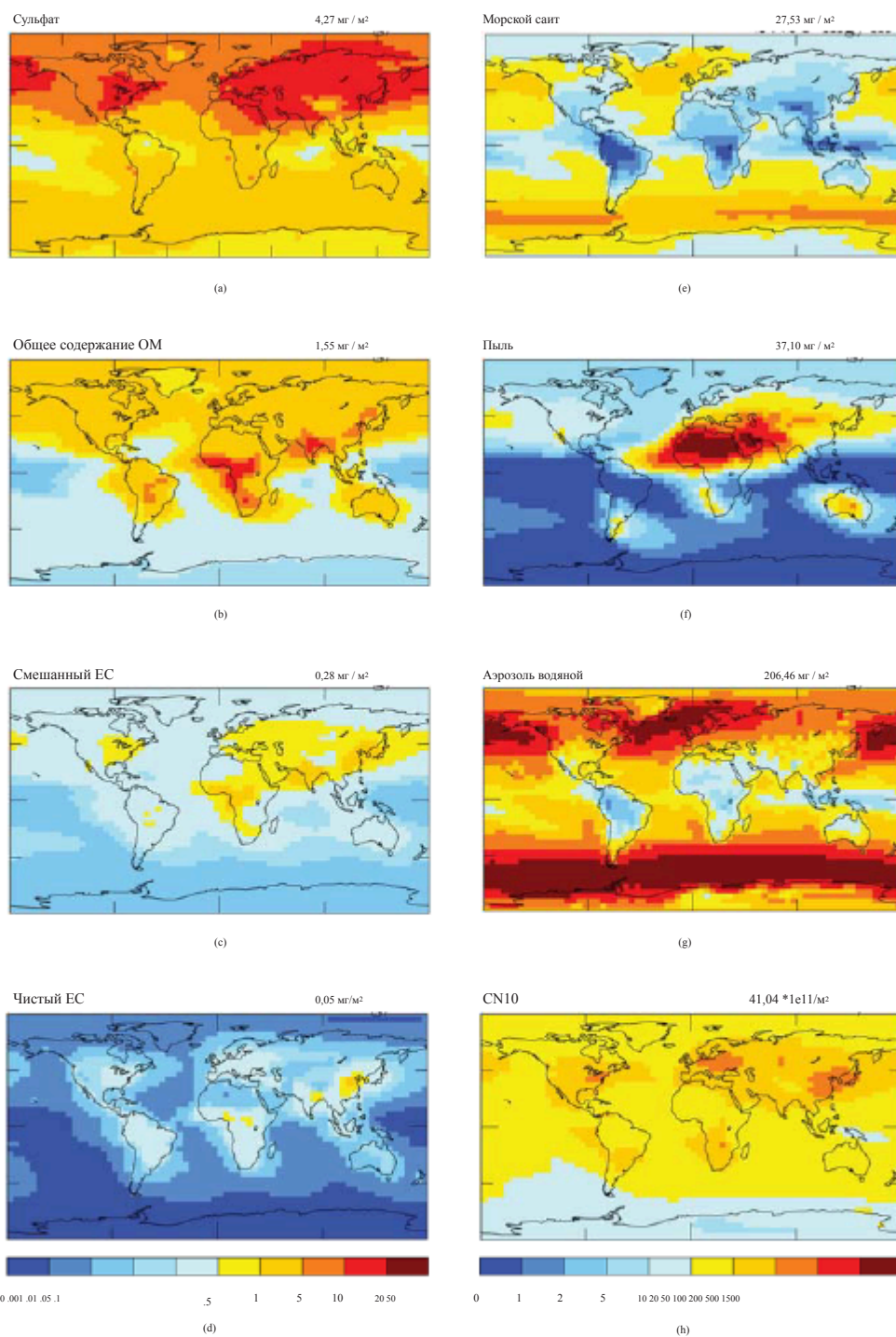
Глобальной трехмерной модели с учетом атмосферных процессов, которые влияют на аэрозолей в атмосфере, а именно выбросов, нуклеации, конденсации, улавливания паров топлива- речь, коагуляции, облачной обработки в атмосфере сухого и влажного осаждения, и химия/климат-механизмы обратной связи. Распределение аэрозолей по размерам в значительной степени зависит от процессов удаления аэрозолей и климатических воздействий. Более того, антропогенные выбросы способствуют превращению нерастворимых частиц в смешанные, покрывая их вторичными продуктами, образующимися в атмосфере. Это увеличивает количество CN, которые могут вырасти до критических размеров и превратиться в CCN, влияя на микрофизические свойства аэрозоля, что влияет на время жизни аэрозоля, глобальное распределение и радиационные свойства. Упрощения необходимы для описания этой сложной атмосферной системы, которые приводят к различиям в

модельное моделирование бюджетов и свойств тропосферных аэрозолей и их воздействия на климат.

Только за последние два десятилетия наше понимание аэрозоля продвинулось достаточно далеко, чтобы успешно интегрировать всю информацию о его появлении в атмосфере, характере распространения и воздействии на глобальные модели переноса химического состава атмосферы и общей циркуляции (GCMS). Воздействие атмосферных аэрозолей на климат зависит как от их концентрации, так и от их свойств. Первые исследования глобальной аэрозольной системы моделировали аэрозольную массу отдельных компонентов аэрозоля: так называемый "массовый подход". В этих исследованиях аэрозоль представлялся либо в виде **внешней** смеси, в котором каждая частица состоит только из одного фунта, или из **внутренней** смеси, в которой каждая частица состоит из однородного агрегата всех отдельных компонентов. Они также предполагали постоянный состав аэрозоля **распределение по размерам**. Однако наблюдения показывают, что состояние смешивания и распределение по размерам глобальной аэрозольной системы сильно различаются, причем вклады как внешних, так и внутренних факторов смешиваются и соотношение компонентов различается.

На рисунке 8.4 представлено глобальное представление среднегодовых атмосферных нагрузок (атмосферных количеств в столбцах) основных компонентов аэрозоля и числа CN, рассчитанных с помощью глобальной климато-химической модели ГИССА-TOMACA (Lee and Adams, 2010). На этом рисунке показано высокое содержание сульфата (SO_4

SO_4^{2-} -аэрозоли над и с подветренной стороны промышленных районов Северной Америки, где антропогенная деятельность является сильным источником выбросов диоксида серы (SO_2), предшественника сульфатных аэрозолей. Окисление SO_2 происходит как в газообразном, так и в водные фазы атмосферы (облака и вода, связанные с аэрозолями) для производить сульфат (SO_4^{2-}), который также вносит немалый вклад (около одной четвертой от общего объема выбросов) из естественных морских источников. Этот вторичный морской источник, образующийся в результате окисления диметилсульфида (DMS), который естественным образом выбрасывается из океанов, распространен по всем океаническим районам, в отличие от наземных источников S, которые сосредоточены в регионах, подверженных важной деятельности человека. Сокращение S содержание сульфатов в топливе и меры по "очистке атмосферы" в отношении промышленных выхлопов уже привели к снижению уровня сульфатов в атмосфере. Ожидается, что эта тенденция сохранится в ближайшие годы. Таким образом, ожидается, что сульфат потеряет значение по сравнению с другими компонентами аэрозоля, такими как нитраты и органические соединения (Канакиду *et al.*, 2005b; Цигаридис и Канакиду, 2007; Им и Канакиду, 2012; Им *et al.*, 2012; Мегаритис *et al.*, 2013). Элементарный углерод (EC), составляющий аэрозоль, часто называют "черным углеродом" (BC), что относится к объемному поглощающему материалу углеродсодержащего аэрозоля, поскольку EC очень часто ассоциируется с каким-либо органическим материалом. EC, недавно выброшенный в атмосферу (рис. 8.4d) или состаренный (смешанный с другими составляющими, рис. 8.4e), демонстрирует высокую нагрузку на районы с высоким содержанием выбросов ископаемого топлива в результате деятельности человека, в основном в НН. Это также показывает высокие нагрузки на открытые пожароопасные зоны в результате естественного сжигания биомассы или пожаров, вызванных деятельностью человека (разрушение зданий, сжигание сельскохозяйственных отходов). Эти мероприятия и их воздействие максимизируются в тропиках. Твёрдые частицы органического вещества (ОА или ОМ; первичного или вторичного происхождения) также являются основными источниками при сжигании ископаемого топлива и биотоплива, а также при открытом пожаре. Кроме того, ОА имеет важные природные источники в земной биосфере, которые могут быть как первичными (растительные остатки, вирусы, бактерии, микробы), так и вторичными (окисление биогенных летучих органических соединений (ЛОС), таких как изопрен, монотерпены, сесквитерпены и т.д.), из почвенной пыли, и из океана (ОА в основном связан с выбросами морской соли) (Канакидоу *et al.*, 2012). ОА также образуется при окислении антропогенных ЛОС. Среднегодовая нагрузка ОА показывает высокие уровни в Северной Америке и максимизируется в континентальных тропиках.



(a-h) Среднегодовое содержание аэрозольного компонента в атмосфере (мг/м) и Рисунок

8.4 числовая концентрация (CN10 на 10¹¹ м⁻³): рассчитано с помощью глобальной модели ГИССА-ТОМАСА. Воспроизведено с разрешения Ли и Адамса, 2010. Авторское право © 2010, Ли и Адамс. Цветовое исполнение смотрите в разделе "Табличка".

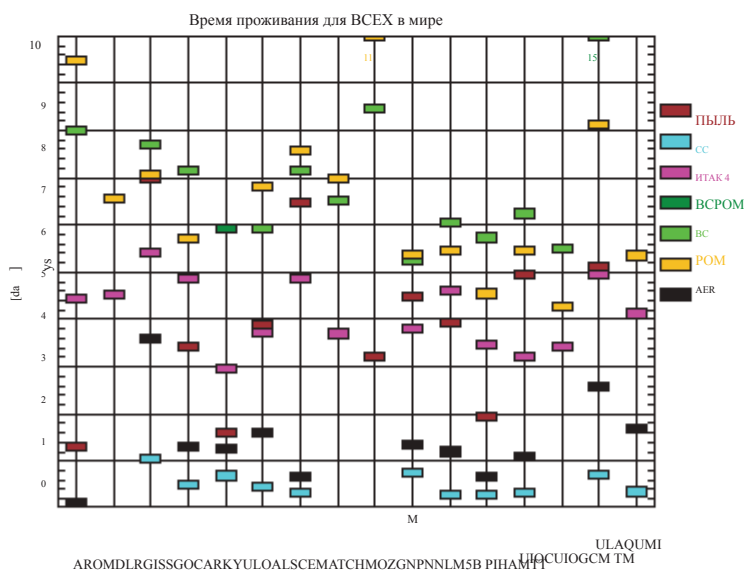
Однако это связано с сильной сезонностью, поскольку бореальные леса вносят значительный вклад в уровень ОА летом, когда биогенные выбросы органических веществ максимальны, и в течение периодов горения бореальных лесов. Мощные природные источники ОА поддерживают потенциальное существование важных механизмов обратной связи между климатом / биосферой и химическим составом атмосферы.

Выбросы морской соли зависят от ветра и температуры и максимальны в зоне юго-западного ветра и в высоких широтах NH (рис. 8.4е). Естественные аэрозольные нагрузки от пыли пустынь (рисунок 8.4f) демонстрируют, безусловно, самые большие максимумы по сравнению с другими компонентами аэрозоля, особенно над Африкой и вспышками в африканских пустынях. Показано, что естественный вклад пыли, морской соли и вторичного органического аэрозоля (SOA) в общую массу аэрозоля значителен в таких регионах, как Средиземноморье, тропическая Атлантика и ближний Восток.

Различия между моделированием аэрозольных моделей задокументированы в рамках международного проекта по взаимному сравнению аэрозольных моделей AEROCOM (AEROSol model inter COMparison project: <http://aerocom.met.no/Welcome.html>; Textor et al., 2006). Различные предположения, касающиеся распределения выбросов по размерам и результирующего времени пребывания в атмосфере (рис. 8.5), обусловленные влажным и сухим осаждением, приводят к различиям между моделями при моделировании аэрозоля в целом и состава аэрозоля (рис. 8.6).

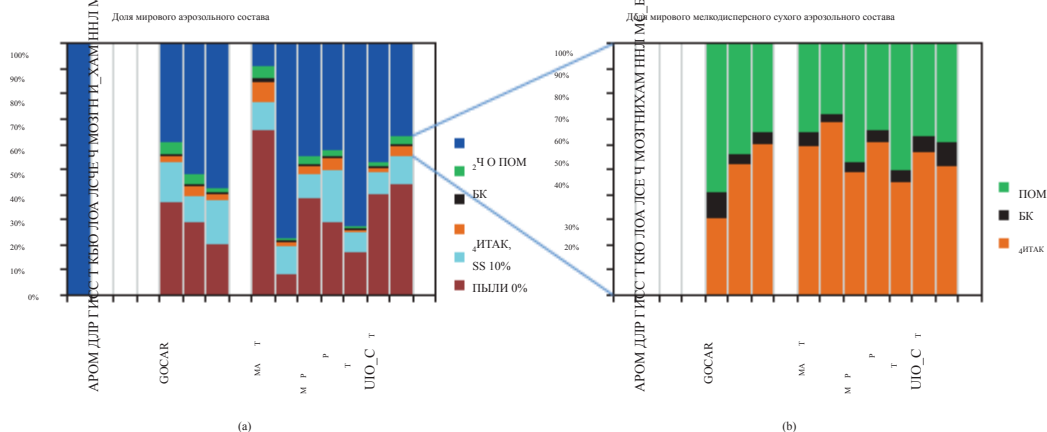
et al

Основные факторы неопределенности при моделировании модели связаны с содержанием воды, связанной с дисперсной фазой, которая может равняться или даже превышать массу сухого аэрозоля (рисунки 8.6а и 8.4 г) (Мешгер et al, 2002; Канакиду et al, 2005b; Ли и Адамс, 2010).



Время пребывания основных компонентов аэрозоля, рассчитанное AERO- Рисунок 8.5

COM-модели во время первой фазы эксперимента. Средние значения (и % стандартного отклонения) следующие: ПЫЛЬ: 4,14 дня ($\pm 43\%$); SS (морская соль): 0,48 дня ($\pm 58\%$); ТАК ЧТО, : 4,12 дня ($\pm 18\%$); технический углерод (BC): 7,12 дня ($\pm 33\%$); органический аэрозоль (POM): 6,54 дня ($\pm 27\%$); общая масса сухого аэрозоля (AER): 1,42 дня ($\pm 65\%$). Воспроизведено с разрешения Textor et al., 2006. Авторское право © 2006, Textor et al. Цветовое исполнение смотрите в разделе "Табличка".



а) Общий состав аэрозоля, выраженный в процентах массовой доли основного вещества **Рисунок**

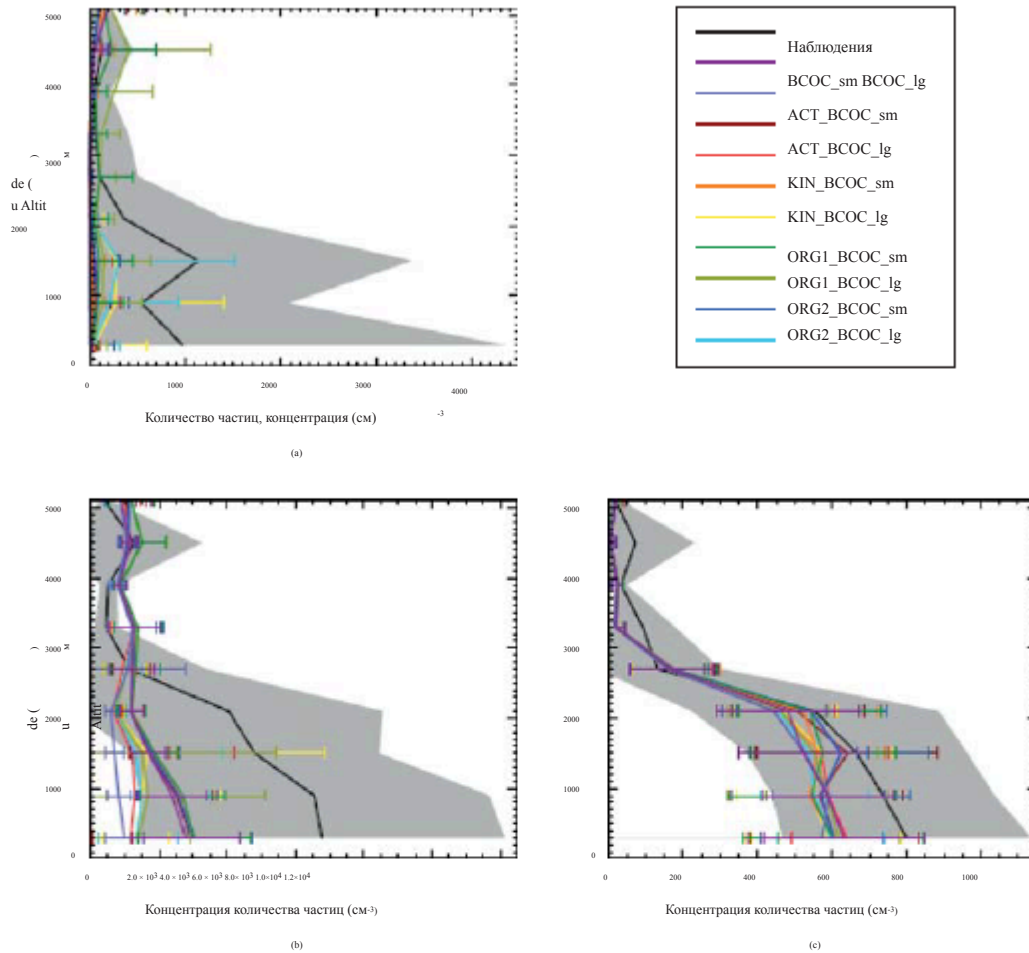
8.6 компоненты аэрозоля в моделях глобального химического переноса, которые участвовали в упражнении AEROCOM I: Но: аэрозольная вода; POM: органический аэрозоль; BC: сажа; SO: сульфат; SS: морская соль; ПЫЛЬ: пыль. (b) Относительный вклад POM, BC и SO в этих моделях используется мелкодисперсный сухой аэрозоль. Воспроизведено с разрешения Textor et al. (2006). Авторское право © 2006, Textor et al. Цветовое исполнение смотрите в разделе "Табличка".

SOA, химически образующиеся в атмосфере, являются еще одним важным источником неопределенностей в моделях. Хотя моделирование SOA развивается быстрыми темпами, оно по-прежнему основано на чрезмерных упрощениях из-за пробелов в нашем понимании возникновения SOA и судьбы в атмосфере (Канакиду *et al.*, 2005а; Фуцци *et al.*, 2006; Холлквист *et al.*, 2009). Глобальные модели, по-видимому, отражают общую картину пространственного распределения основных компонентов аэрозоля. Однако они существенно не воспроизводят наблюдаемые профили (например, для BC см. Koch *et al.*, 2009, 2010 гг., а также об органических аэрозолях см. Heald *et al.*, 2005, 2011).

Недавно наблюдения за тропосферой, свободной от CN, стали доступны благодаря интенсивным кампаниям с самолетов (например, кампания EUCAARI-LONGREX в мае 2008 г.; Реддингтон *et al.*, 2011). Параллельно с этим разработка микрофизических моделей позволяет моделировать количество концентраций частиц, что может улучшить оценки воздействия аэрозоля на здоровье и климат мате (Реддингтон *et al.*, 2011; Фонтукис *et al.*, 2012). Сравнение между глобальные модели результатов и наблюдений в ходе LONGREX кампании (рис. 8.7) показали кон- существенные неопределенности, связанной с лечением частицы формирования (зарождения) в пограничном слое и в размере распределение испускаемых первичных частиц, что приводит к uncer- tainties в предсказывали СИЦН концентрации.

8.5 Подавление радиации аэрозолями (Прямой эффект)

Поглощение света атмосферным аэрозолем зависит как от количества аэрозоля на пути прохождения света в атмосфере, так и от оптических свойств аэрозоля, которые варьируются в зависимости от длины волны, относительной влажности и характеристик рассеяния или поглощения. Рассеяние и поглощение света атмосферными аэрозолями, предполагая, что они являются сферическими частицами, может быть описано теорией Ми. Для этого требуется относительный показатель преломления, который равен



(a-c) Черная линия: вертикальное распределение концентраций CN, наблюдаемое во время

8.7 Кампания LONGREX над Европой в мае 2008 г.; заштрихованные линии: сравнение с результатами модели.

Полосы ошибок и затенение представляют стандартное отклонение модели и наблюдений,

соответственно. Воспроизведено с разрешения Реддингтона et al. (2011). Авторское право © 2011,

Реддингтон et al. Цветовое исполнение смотрите в разделе "Табличка".

показатель преломления частицы (т. е. материала, из которого состоит аэрозоль),

деленный на показатель преломления воздуха, в котором присутствует аэрозоль.

Показатель преломления материала описывает, как через него распространяется излучение. Однородные

частицы характеризуются одним показателем преломления на данной длине волны. Для отдельной частицы,

комплексный показатель преломления:

$$N(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda) \quad (8.1)$$

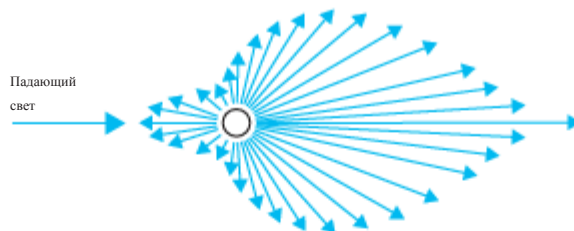
имеет два термина: $k(\lambda)$ является компонентом показателя поглощения, зависящего от длины волны, и $n(\lambda)$

является соответствующей составляющей индекса рассеяния. Это, вместе с размером аэрозоля и

композиция, определяет альбедо однократного рассеяния (SSA или

ω_0)

$$SSA = \frac{\text{рассеивание}}{\text{поглощение} + \text{рассеивание}} \quad (8.2)$$



Функция фазы предоставляет информацию о направлениях, под которыми **Рисунок**

8.8 падающий свет рассеивается частицей. Чем крупнее частица, тем больше она рассеивается., чем больше переднее рассеяние. Воспроизведено с разрешения http://www.iup.uni-bremen.de/E-Learning/at2-els_NO2/index.htm.

Это определяется как отношение эффективности рассеяния к полному поглощению (рассеяние плюс поглощение) аэрозоля. Интерпретация SSA заключается в том, что при $SSA = 1$, исследуемый аэрозоль полностью рассеивается и снижает глобальную среднюю поверхность

температура; очень низкие значения ω укажите, что аэрозоль увеличит глобальное среднее значение температуры поверхности.

Атмосферным частицам, содержащим более одного компонента, требуется эффективный показатель преломления, который объясняет их неоднородность. Основываясь на теории Ми и предполагая, что частица имеет единственную форму сферической формы, можно рассчитать фазовую функцию рассеяния (рис. 8.8), которая обеспечивает долю рассеянного излучения в различных направлениях (под разными углами) вокруг частицы. Согласно теории Ми, наибольшее ослабление излучения атмосферными аэрозолями происходит при длинах волн, аналогичных по размеру частицам.

Параметр **Ми** или **параметр размера** (a), который рассчитывается исходя из соотношения периметр поперечного сечения рассеивающей частицы ($2\pi r$, где r - это радиус частицы) $\pi \lambda$ к длине волны (λ) падающего света ($a = 2\pi r / \lambda$), определяет механизм рассеяния света от частицы. Для $a \approx 1$, имеет место Ми-рассеяние (упругое рассеяние на аэрозолях и каплях).

Поглощение света оптическим методом описывается законом Бера-

Ламберта, основанным на коэффициенте поглощения среды (b_a),

который не учитывает рассеяние. Рассматривается значение b_{ext} (сумма поглощения и рассеяния), которое учитывает как поглощение, так и рассеяние. Рассеяние учитывается, аналогично используя поперечное сечение рассеяния (σ_s) среды и коэффициент рассеяния-

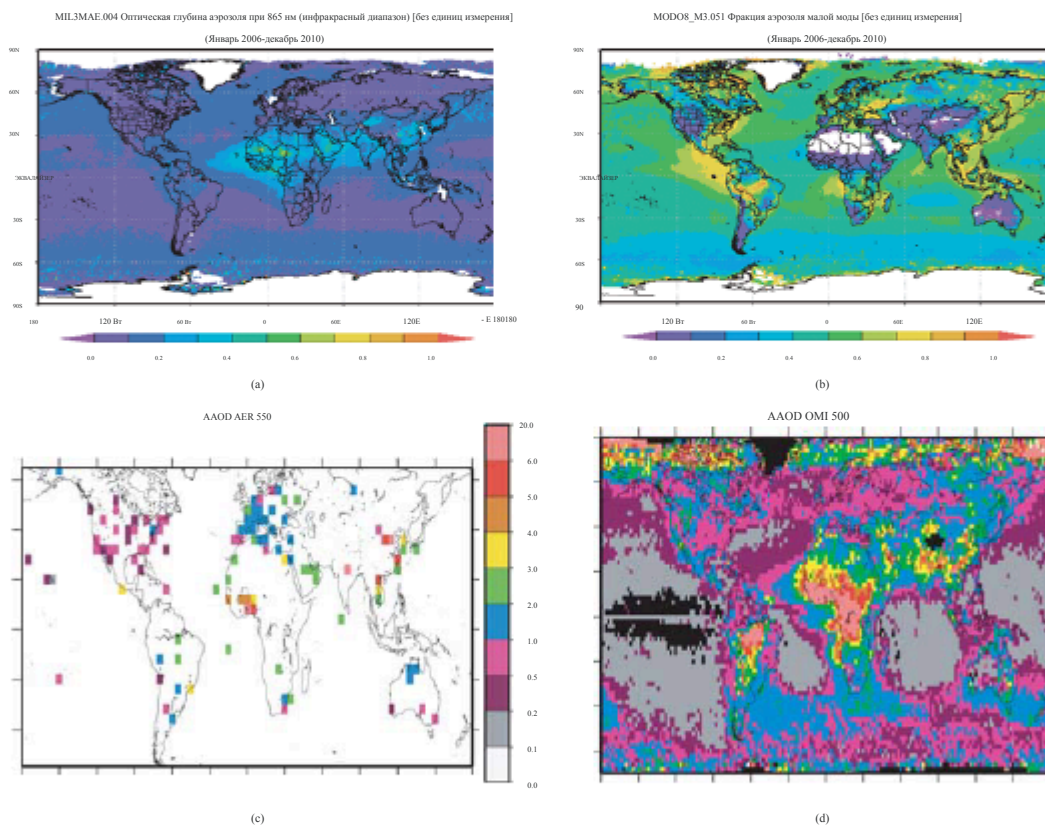
эффективный (b_s). Учет поглощения за счет рассеяния для ансамбля аэрозольных частиц в атмосферном слое (вдоль вертикальной траектории, например, на высоте) в зависимости от длины волны обеспечивает зависящую от длины волны эффективную оптическую глубину аэрозоля (AOD) в этом слое. Обратите внимание, что общая эффективная (суммарная) оптическая глубина атмосферного слоя также учитывает ослабление излучения облаками и водяным аэрозолем, а также поглощение газами и молекулярное (рэлеевское) рассеяние. Подобно SSA отдельной частицы, для атмосферного слоя SSA дает долю ослабления излучения, возникающую в результате рассеяния света (Уравнение 8.1), и эффективный коэффициент асимметрии (g), который предоставляет информацию о распределении излучения, рассеянного несферическими аэрозолями в различных направлениях вокруг них. Коэффициент асимметрии равен среднему значению косинуса угла рассеяния, взвешенному по фазовой функции рассеяния, и обычно используется в расчетах двухпоточкового переноса излучения. Когда фактор асимметрии (g) приближается к +1, сильно рассеивая пики в прямом направлении, и когда g равно -1, сильное рассеяние достигает максимума в обратном направлении. В целом, $g = 0$ указывает направления рассеяния, равномерно распределенные между прямым и обратным направлениями; например, изотропное рассеяние (например, рассеяние от

мелкие сферические частицы). Эти параметры чаще всего определяются как функция длины волны.

8.5.1 Оптическая глубина аэрозоля и прямое радиационное воздействие компонентов аэрозоля

Хотя массовая концентрация аэрозоля с разбивкой по размерам является основным показателем аэрозольной нагрузки в моделях, эта величина преобразуется в AOD через эффективность поглощения компонентов аэрозоля для сравнения с данными дистанционного зондирования (наземного или спутникового) наблюдений и последующей оценки прямого радиационного воздействия аэрозоля (RF). Обратите внимание, что каждая модель использует свою собственную эффективность поглощения, основанную на ограниченных знаниях об оптических и физических свойствах каждого типа аэрозоля. Таким образом, модели могут создавать различные распределения аэрозольной нагрузки в виде массовых концентраций, но согласовывать свои распределения AOD, и наоборот (Chin *et al.*, 2009).

AOD атмосферы, полученный на основе спутниковых наблюдений, показывает значительное исчезновение аэрозоля из-за пыли пустынь и сжигания биомассы в тропиках и загрязняющего аэрозоля над Южной Азией (рисунок 8.9а). Благодаря быстро расширяющимся возможностям поиска, наблюдения satel- lite теперь предоставляют информацию о размере аэрозолей, разделяющих



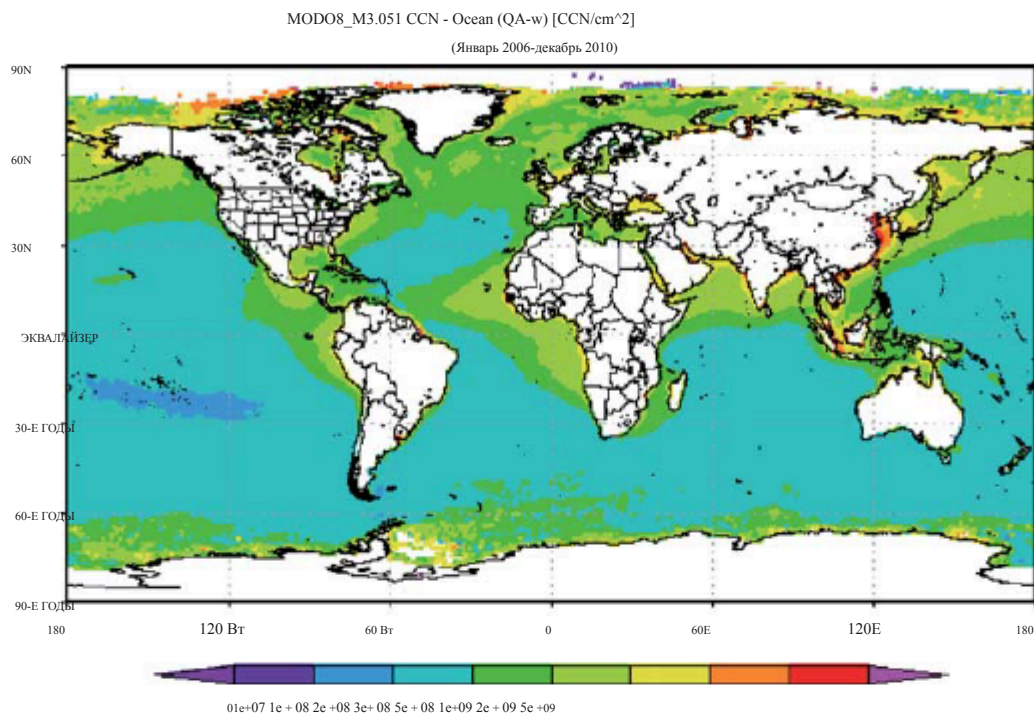
(a) Оптическая глубина аэрозоля при 550 нм, полученная со спутника MODIS Рисунок 8.9 наблюдения. (b) Доля AOD малого режима, наблюдаемая MODIS (усредненная за 5 лет с января 2005 года по декабрь 2010 года). Рисунок (a) и (b) получены с помощью веб-инструмента Giovanni NASA. Воспроизведено с разрешения Acker и Lepkovich, 2007. (c) AOD поглощения от AERONET. (d) Годовой AOD поглощения от OMI на основе продуктов повседневного спроса с 2005 по 2007 год. Рисунок (c) и (d) адаптированы с разрешения Koch *et al.*, 2009. Авторское право © 2009, Koch *et al.* Цветовое исполнение смотрите в разделе "Табличка".

доля AOD в мелком режиме (как показано на рисунке 8.9b) по данным наблюдений MODIS (январь 2006 г. - декабрь 2010 г.). Этот рисунок показывает присутствие небольших аэрозолей с подветренной стороны от промышленных районов загрязнения и районов сжигания биомассы в Северной Америке и тропиках. Снимки были сделаны с помощью веб-инструмента Giovanni NASA (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/overview/index.html>) и дополняются/подтверждаются данными глобальной сети солнечных фотометров (http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_AERONET_NASA.html). На рисунке 8.9c показаны данные о поглощении AOD (которые в основном зависят от уровней BC) со станции AERONET, собранные Koch *et al.* (2009), в то время как на рисунке 8.9d показано годовое значение AOD поглощения, полученное с помощью прибора для мониторинга озонового слоя (OMI).

Таким образом, RF аэрозолей в атмосфере определяется на основе пространственно-временного распределения исследуемых компонентов аэрозоля и их оптических свойств. Кроме того, изменения относительной влажности окружающей среды влияют на воду, поглощаемую атмосферными аэрозолями, и количество растворимых компонентов аэрозоля, растворенных в водной фазе аэрозоля, тем самым изменяя химический состав аэрозолей, размер частиц и оптические свойства частиц. Радиационное воздействие зависит от коэффициента отражения подстилающей поверхности и инсоляции. Для рассеивающего аэрозоля наиболее сильное радиационное воздействие возникает, когда коэффициент отражения поверхности низок, в то время как для поглощающего аэрозоля радиационное воздействие является наиболее сильным, когда коэффициент отражения поверхности высок. По тем же причинам радиочастотное излучение аэрозоля зависит от его местоположения относительно любых облаков, поскольку облака увеличивают излучение над своим слоем и уменьшают его ниже (рис. 8.3). Таким образом, аэрозоли под облаками будут получать меньше радиации, чем аэрозоли в безоблачных атмосферных условиях, в то время как аэрозоли над облаками будут получать еще больше.

8.6 Аэрозоли и облака (косвенный эффект)

Аэрозоли служат CNS; то есть поверхностями, на которых водяной пар и полу- или низкотлетные газы могут конденсироваться, увеличивая аэрозоль до тех пор, пока он не достигнет критического размера и не превратится в CCN. При благоприятных условиях окружающей среды с низкой температурой аэрозоли также могут служить зародышами льда (IN). На рисунках 8.1 и 8.5 показано наблюдаемое распределение CNS в глобальной атмосфере. На рисунке 8.10 показано распределение CCNS над океаном, полученное из наблюдений MODIS. Таким образом, увеличение концентрации аэрозоля и / или изменения свойств аэрозоля могут изменять микрофизические и радиационные свойства облаков, а также эффективность предотвращения фильтрации и, следовательно, продолжительность жизни облаков (Хейвуд и Буше, 2000). Однако причинно-следственная связь между аэрозолями и облаками/осадками подтверждена не во всех изученных условиях. Несмотря на десятилетия исследований, создание климатически означательных отношений между аэрозолями, облаками и осадками по-прежнему остается проблемой. Стивенс и Файнголд (2009) предположили, что эта трудность была вызвана неучтенными процессами, которые смягчают реакцию облаков и осадков на возмущения аэрозоля. В этом тщательном обзоре существующих данных они предположили существование **микрофизического** (в масштабе облака капли) и **макрофизического** (в масштабе облака и окружающей его атмосферы) механизмы буферизации в атмосфере. Микрофизические буферы связаны, например, с изменениями в распределении по размерам или составу активного в облаках аэрозоля. При отсутствии других эффектов, такие изменения приводят к уменьшению количества облачных капель, но также приводят к локальному более высокому перенасыщению. Это, как правило, частично компенсирует или даже уравнивает первоначальные изменения, позволяя активировать меньшие ЦНС. Макрофизические буферы, связанные с, например, углубление в облаках, вызванное снижением местного осадков связи



Концентрации ядер конденсации облаков (CCNs) над океаном, как видно Рисунок

8.10 по MODIS, усредненный за 5 лет с января 2005 по декабрь 2010. Рисунок

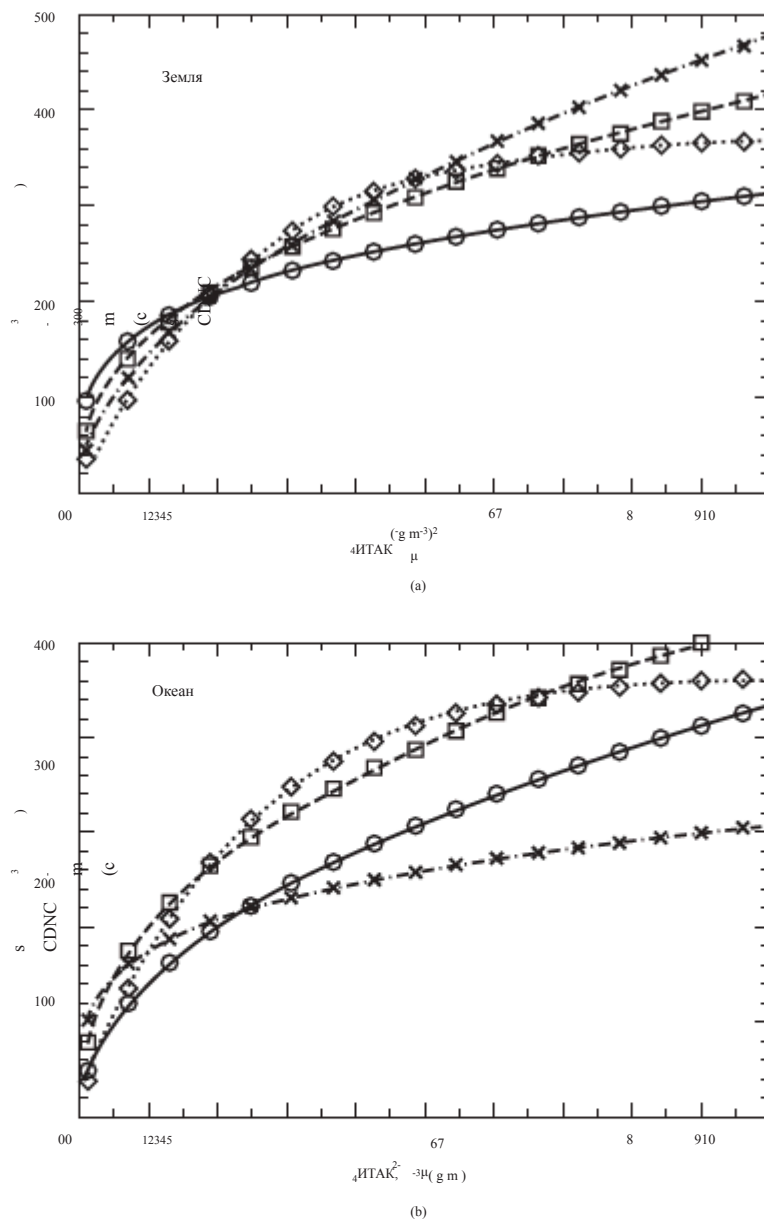
создан с помощью веб-инструмента Giovanni NASA (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/overview/index.html>). Цветную версию смотрите в разделе "Таблица".

для большего количества (меньшего) CCNs. Более глубокие облака вызывают более сильный дождь, который компенсирует первоначальное замедление выпадения осадков из-за загрязняющего аэрозоля.

Первым моделирование исследований аэрозольного облака взаимодействия прикладных эмпирических CAL и наблюдение отношений между сульфатного аэрозоля массовой концентрации (используются в качестве прокси для антропогенные гигроскопического аэрозоля) и осадки.

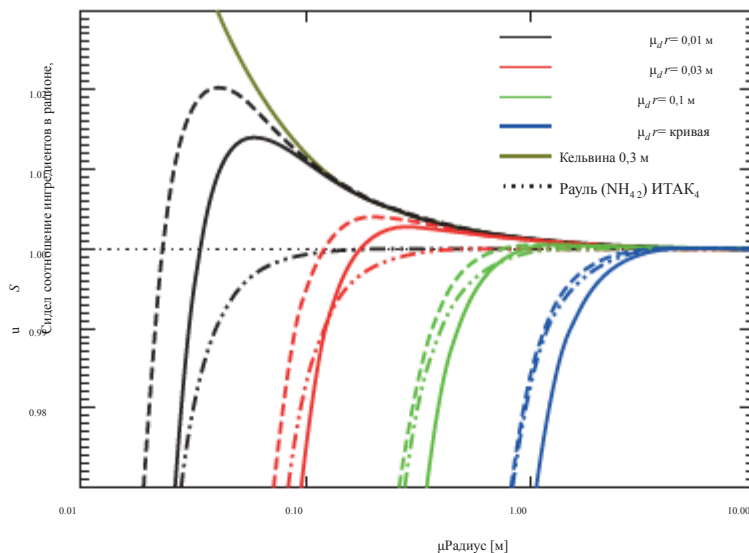
8.6.1 Как стать аэрозолей CCNs и развиваться в облачных капель

Первым шагом в моделировании аэрозольное облако взаимодействий заключается в имитации, которая аэрозоли от Acti- вате и стать облачной капли, и когда. Гигроскопический рост неорганических частиц описывается уравнением Келера, которое относится к условиям равновесия аэрозоля с окружающей его атмосферой. Теория Келера определяет содержание водяного пара, необходимое для образования капли, в зависимости от сухого радиуса (или диаметра) и химического состава аэрозоля, часто выражаемого в терминах равновесного соотношения содержания воды в окружающей среде, S , и размер капли (подробности в Seinfeld and Pandis, 1998 и приложении в Kanakidou *et al.*, 2005a). В Келер теории приходится как Кельвину (справочник-термодинамические эффект) и Рауля (химический состав - раствор срока) эффекты. Эта кривая



Наблюдаемые корреляции между концентрациями числа облачных капель (CDNCs) **Рисунок 8.11** и массовой концентрацией сульфатного аэрозоля. Символы показывают различные параметры. (а) над сушей, (б) над океаном. Рисунок изменен по оригиналу Хейвуда и Буше (2000), где можно найти больше деталей.

(Рис. 8.12) обеспечивает превышение давления водяного пара, необходимого для образования капли, над равновесным давлением пара (степенью насыщения) в зависимости от размера (радиуса) капли. Член Кельвина $(1 + a/r)$ зависит от размера частицы и пропорционально обратно пропорционально радиусу частицы r ($\sim 1/r$). В ней описывается так называемая кривизна эффект, который заключается в увеличении СБ-igation давление пара над капля размер r по сравнению с плоской поверхностью. Противодействие эффекту Кельвина, присутствию растворенных веществ (эффект химического состава - термин Рауля из книги



Кривые Келера для сульфата аммония (пунктирные) и хлорида натрия (твердые) для Рисунок

8.12 различные радиусы аэрозоля, отделяющие Кельвин от эффекта Рауля. Воспроизведено с разрешения

Ломанна, 2009. Авторское право © 2009, Ломанн. Цветное исполнение смотрите в разделе "Табличка".

уравнение) снижает давление насыщенного пара. Этот эффект зависит от объема

аэрозоля ($1 - \delta / r^3$) и, следовательно, пропорционален величине, обратной кубу радиуса,

$1/r^3$. При небольших размерах эффект Рауля более важен, чем эффект Кельвина.

Кривая Келера (пример приведен на рис. 8.12) резко возрастает при $S_{\text{уравнение 1}}$ и достигает максимума на некотором $S_{\text{критический}}$ выше единицы, что является так называемым "критическим пересыщением". При превышении температуры окружающей среды водяной пар диффундирует в сторону и конденсируется. $S_c S$ на каплю, что приводит к неограниченному росту капли, которая, таким образом, "активируется", и образованию атмосферных облаков. Из-за конкурирующих членов Кельвина и Рауля в уравнении Келера мелкие частицы должны усваивать больше растворимого вещества по отношению к своей массе, чем более крупные. Однако требуемая растворимая масса на частицу относительно нечувствительна к диаметру исходной нерастворимой частицы.

Внутри облака движущая сила увеличения S охлаждения, как правило, вызвано расширением-Сьон восходящие потоки воздуха, смешиваясь, или излучения. Истощение водяного пара и выделение скрытого тепла при конденсации воды замедляют увеличение S , и в какой-то момент S достигает максимума. В принципе, все капли с критическим пересыщением ниже максимального значения S может активироваться с образованием облачных капель, хотя диффузионный рост капель может быть достаточно медленным, чтобы все такие капли не успели активироваться (Ненес *et al.*, 2001).

Конкуренция между скоростью охлаждения окружающей среды в восходящем воздухе и конденсационным истощением водяного пара из растущих CCNS определяет максимальное значение S а также количество активированных капель. Таким образом, все, что может повлиять на скорость роста капель, потенциально повлияет на количество облачных капель. Максимальное значение S на него влияют количество, концентрация, распределение по размерам и состав присутствующих аэрозольных частиц. Композиционные эффекты выражаются не только в S но также может влиять на массоперенос

уравнение отношение водяного пара к капле. Это связано с тем, что размер CCNs сравним со средней длиной свободного пробега молекул воздуха; таким образом, вероятность попадания молекулы водяного пара

"прилипание" к растущей капле будет влиять на коэффициент массопередачи водяного пара к капле (Сайнфельд и Пандис, 1998).

Экспериментально эффективность сухих аэрозолей в улавливании атмосферной воды и росте определяется гигроскопичностью аэрозоля, которая обычно выражается коэффициентом роста (GF). GF аэрозоля может быть измерен в атмосфере как отношение между диаметром увлажненных и сухих частиц при эталонной относительной влажности, которая в большинстве исследований составляет 90% (или результаты преобразуются в относительную влажность 90%). Недавно Петтерс и Крейденвейс (2007) представили метод для описания взаимосвязи между сухим диаметром частиц и активностью CCN с использованием $\sin$ -параметр гигроскопичности g_{le} , который определяется через его влияние на активность воды, a_w , раствора; то есть отношение давления водяного пара, которое ощущают частицы:

$$V_w a = 1 + \kappa \frac{V}{V_w} \quad (8.3)$$

где V представляет собой объем сухих твердых частиц и V_w - это объем воды.

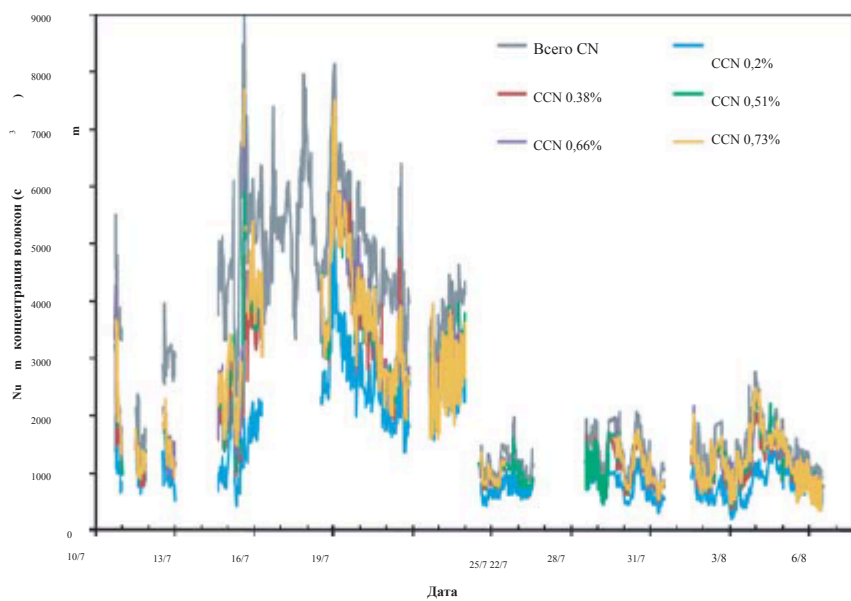
Значения κ составляют от 0,5 до 1,4 для солей с высокой активностью CCN, таких как хлорид натрия, от 0,01 до 0,5 для органических соединений средней гигроскопичности и 0 для негигроскопичных компонентов. Наблюдения показывают, что атмосферные частицы являются типичными - в целом характеризуется величиной $0,1 < \kappa < 0,9$. Параметр многокомпонентной гигроскопичности может быть вычислен путем взвешивания параметров гигроскопичности компонентов по их объемным долям в аэрозольной смеси при известном химическом составе аэрозолей и гигроскопичности-параметры каждого компонента аэрозоля.

κ затем используется в теории Келера для моделирования активации облачных капель. На рисунке 8.13а показаны летние наблюдения CNS и CCN в Средиземноморье (Бугиатиоти *et al.*, 2011), которые четко указывают на различную активацию фракций аэрозоля (рис. 8.13b) и что не все аэрозоли обладают активирующими свойствами.

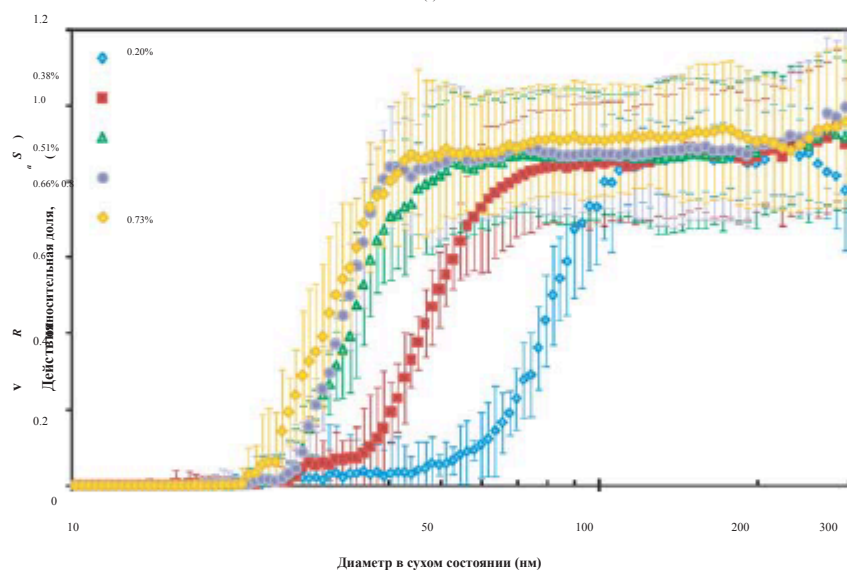
Как правило, исследования взаимодействия аэрозоля с облаком предполагают, что CCN образуются из аэрозолей, которые содержат значительное количество растворимого материала, и, таким образом, их рост может быть описан теорией Келера. Однако недавние исследования показывают, что аэрозоли минеральной пыли также могут действовать как хорошие CCN, поскольку они могут впитывать воду на своей поверхности (DeMott *et al.*, 2003; Левин *et al.*, 2005; Соломос *et al.*, 2011). Зависимость CCNs от диаметра сухого аэрозоля для аэрозолей, состоящих в основном из растворимого материала, отличается от зависимости для аэрозолей, которые в основном состоят из нерастворимого материала. Кумар, Соколик и Ненес (2009), предполагая наличие внешней смеси растворимых и нерастворимых аэрозолей, разработали параметр активности CCN, который следует теории Келера для растворимых материалов и учитывает теорию активации абсорбции для нерастворимых материалов. Улучшение этого параметра позволяет обрабатывать аэрозоли, содержащие как растворимые, так и нерастворимые вещества (Кумар *et al.*, 2011).

Каридис *et al.* (2011) далее применили эту концепцию в GCM, учитывающем активированные CCN из (i) частиц, которые следуют теории Келера (в основном растворимый материал), (ii) частиц, которые следуют теории поглощения Френкеля -Хэлси - Хилла, (iii) гигантских CCN, активационное поведение которых представляет собой границу между частицами, которые испытывают значительный рост после активации, и теми, которые сильно ограничены кинетически, и (iv) гигантских CCN, которые следуют теории активации поглощения и существенно не растут после активации. Таким образом, они обнаружили, что покрытие пыли гигроскопичными солями увеличивает вклад пыли в CCNS в два раза, при этом существенно сокращая перенасыщение в облаках на начальных стадиях формирования облаков и, в конечном итоге, снижает CDNC.

Кроме того, Мур *et al.* (2013), исследуя чувствительность CDNC к CCN-активным количественным концентрациям аэрозоля, обнаружили небольшую зависимость по континентам (10-30%), но



(a)



(b)

(a) Временные ряды измерений CN и CCN в Финокалии, Крит, Греция во время Рисунок 8.13

кампания FAME. (b) CCN-спектры с разрешением по размеру аэрозоля при различных уровнях пересыщения

(0,2 - 0,73%), показывающие долю активированного аэрозоля в зависимости от диаметра частиц в сухом

состоянии. Воспроизведено с разрешения Bougiatioti et al. (2011). Авторское право © 2011, Bougiatioti.

Цветную версию смотрите в разделе "Табличка".

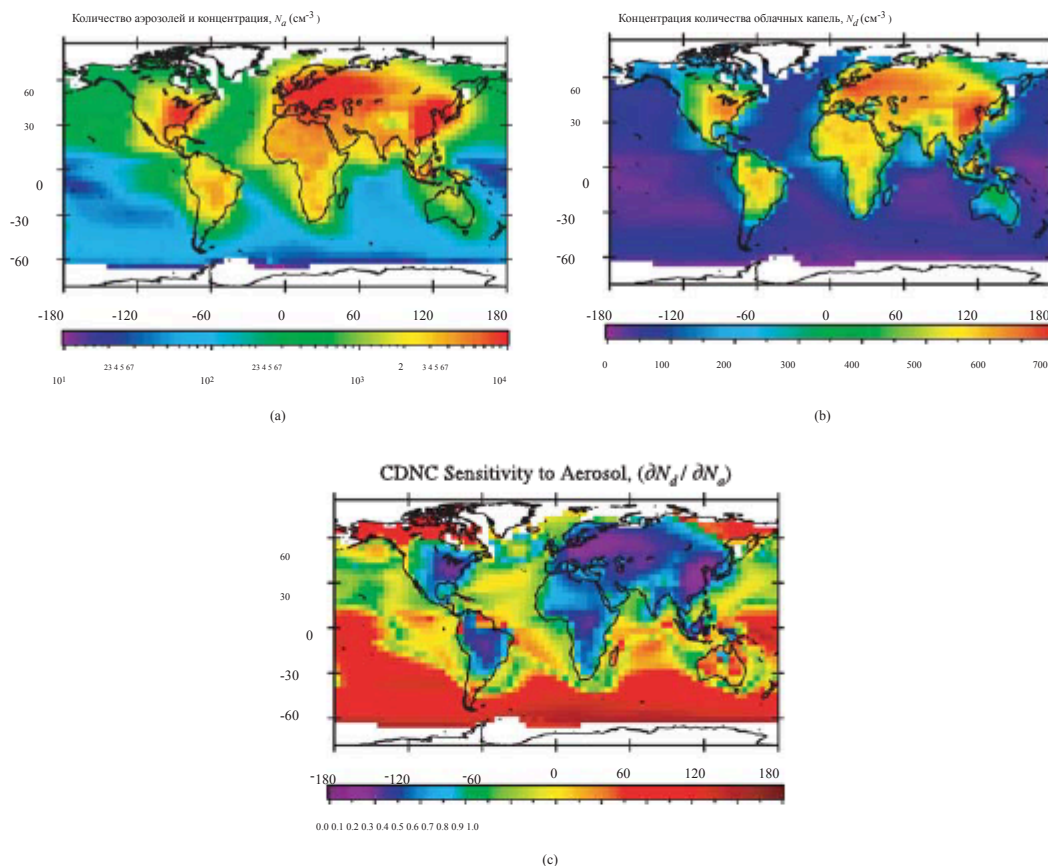
эта чувствительность превышает 70% в нетронутых регионах (рис. 8.14). Этот результат свидетельствует о

том, что над удаленными регионами можно ожидать косвенного воздействия аэрозоля, вызванного антропогенными

факторами. Эти результаты согласуются с моделированием и вспомогательными синергетическими

исследованиями Сорусиана *et al.* (2009), которые обнаружили, что для облаков с промежуточным слоем

жидкой воды аэрозоль эффективно подавляет выпадение осадков.



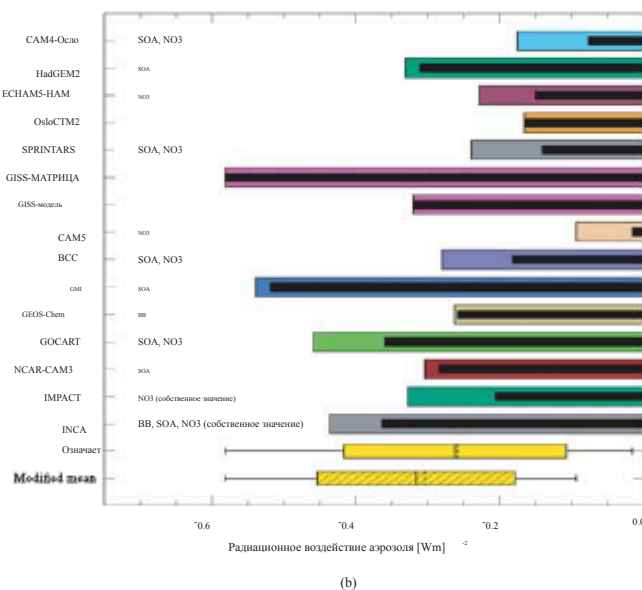
8.14 Смоделированная среднегодовая (а) концентрация ядер конденсации (количество аэрозолей)- Рисунок 8.14 (b) концентрация CDNC и (c) чувствительность CDNC к изменениям аэрозоля максимальна над океаном и удаленными районами. Воспроизведено с разрешения Moore, et al. (2013). Копия-справа © 2013, Мур et al. Цветовое исполнение смотрите в разделе "Табличка".

8.7 Оценки радиационного воздействия

"Радиационное воздействие" - это мера изменений в энергетическом балансе системы Земля - атмосфера в результате изменений факторов (например, аэрозолей), влияющих на климат; то есть изменение энергетического баланса между поступающей солнечной радиацией и исходящим инфракрасным излучением в атмосфере Земли, которое выводит систему из ее нормального состояния (Форстер *et al.*, 2007). Положительное радиационное воздействие приводит к избытку энергии в системе по сравнению с ее нормальным состоянием и, следовательно, к глобальному потеплению, тогда как отрицательное радиационное воздействие снижает температуру земли. В глобальном масштабе радиационное воздействие может быть связано с изменениями глобальной средней температуры с помощью глобального среднего параметра, называемого **чувствительность климата** ($\lambda = \Delta T / \Delta F$), который является параметром, зависящим от модели. Однако это не тот случай, когда исследуются региональные воздействия атмосферных факторов изменения климата, которые являются недолговечными, такими как аэрозоли, и, следовательно, представляют значительную пространственную неоднородность.

Из-за больших неопределенностей в модельных оценках радиационного воздействия аэрозолей, сообщество разработчиков моделей стремится к надежности результатов упражнений по взаимному сравнению моделей

Цена, погрешности воздействия отдельных компонентов аэрозоля выше, чем погрешности воздействия общего воздействия аэрозоля. Различия в аэрозольной нагрузке, коэффициенты массового поглощения и

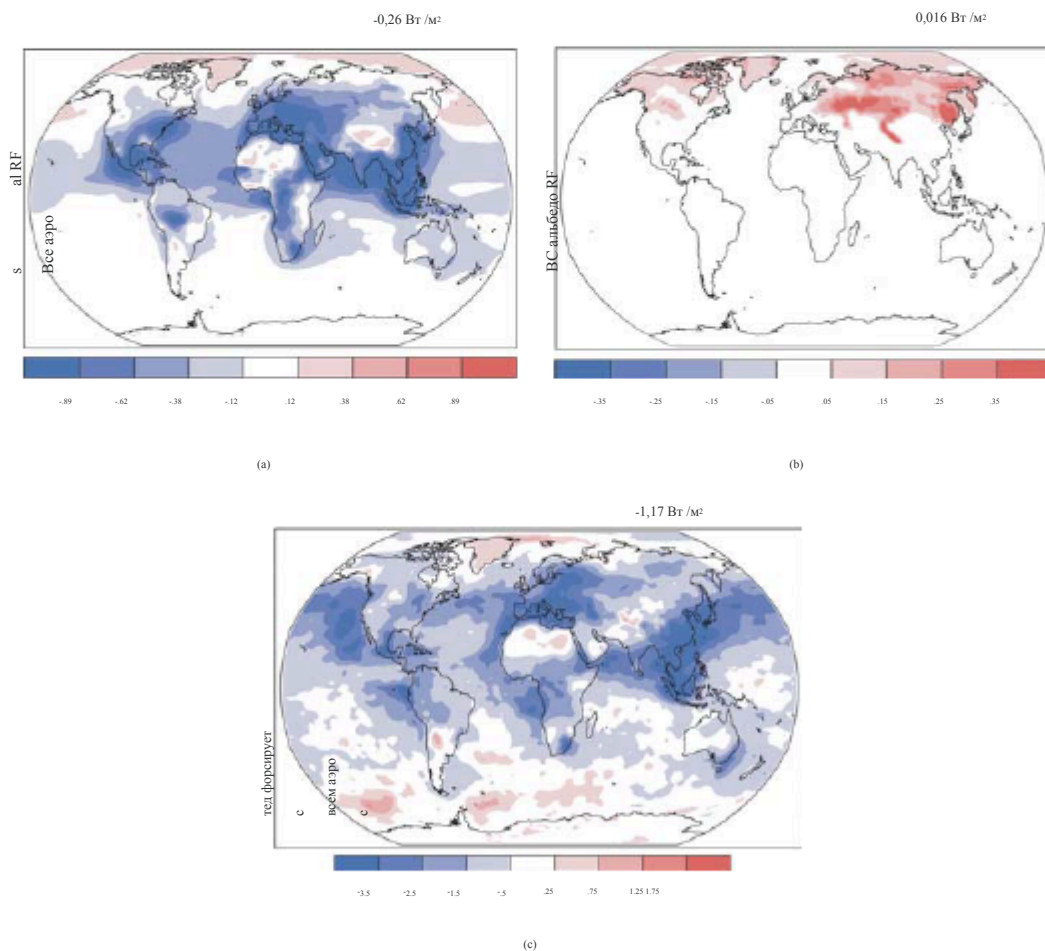


(а) Прямое радиационное воздействие на компонент аэрозоля (внутренние столбики) за период 1750-2010 - среднее значение по моделям AEROCOM. (б) Общее прямое радиационное воздействие аэрозоля, рассчитанное по 16 глобальным моделям. Черными полосами показано смоделированное воздействие, заштрихованными полосами показано воздействие, измененное компонентами модели. Светлыми полосами показано среднее значение общего радиационного воздействия прямого аэрозоля от AEROCOM. Светлая заштрихованная полоса показывает среднее значение AEROCOM, когда для недостающих компонентов аэрозоля производится корректировка компонентов аэрозоля. В квадратах указано одно стандартное отклонение, в то время как усики указывают максимальное и минимальное распределение. Воспроизведено с разрешения Myhre et al . (2013). Авторское право © 2013, Myhre et al . Цветовое исполнение смотрите в разделе "Табличка".

в качестве основных причин этого было определено нормализованное радиационное воздействие на AOD, вносящее аналогичный вклад в распространение. Рассчитанное среднее прямое аэрозольное излучение за период с 1750 по 2010 год составило $-0,39 \text{ Вт} / \text{м}^2$.

Аналогичные результаты были получены в рамках Проекта по взаимному сравнению моделей химического состава атмосферы и климата (ACCMIP), в котором изучалось как обычное прямое радиационное воздействие в тропосфере, так и воздействие, включая быстрые корректировки (скорректированное воздействие, включая прямые и косвенные эффекты, по Форстеру *et al.* (2007)), за период 1850-2000 годов (Шинделл *et al.*, 2013). Прямое воздействие аэрозоля составило $-0,26 \text{ Вт} / \text{м}^2$ (Рис. 8.16а), увеличенный до $-0,39 \text{ Вт} / \text{м}^2$ результаты были скорректированы на отсутствие компонентов аэрозоля в некоторых моделях. Shindell *et al.* (2013) также рассчитали среднее воздействие

аэрозоля с поправкой на этот период, которое составило $-1,17 \text{ Вт} / \text{м}^2$ (Рис. 8.16с). Это значение, которое почти в три раза превышает прямое радиационное воздействие, указывает на то, что корректировки аэрозолей, которые включают облачность, водяной пар и температуру, приводят к более сильному воздействию, чем прямое радиационное воздействие аэрозоля. Оба воздействия наиболее сильны над Северной Америкой, Европой и Юго-Востоком.



8.16 (а) прямое радиочастотное излучение от всех аэрозолей (среднее значение для 10 моделей). (б) радиационное воздействие из-за изменений альbedo поверхности. (с) Скорректированный (прямой и косвенный) радиочастотный сигнал от всех аэрозолей.

Результаты моделирования ACCMIP. Принято с разрешения Shindell et al. (2013).

Авторское право © 2013, Шинделл et al. Цветовое исполнение смотрите в разделе "Табличка".

Азия. Скорректированное воздействие аэрозоля является положительным над полярными регионами. На рисунке 8.16с показано вычисленное радиационное воздействие, вызванное отложением ВС, которое изменяет альбедо снега, приводя к глобально небольшому, но регионально важному положительному воздействию (эффект потепления).

8.8 Путь Вперед

Пространственно-временная изменчивость свойств аэрозолей и пробелы в наших знаниях о процессах, которые изменяют свойства аэрозолей в атмосфере и связывают аэрозоли с облаками, обеспечивают простой метод оценки воздействия аэрозолей на климат. Следовательно, необходимо дальнейшее понимание процесса, особенно в том, что касается роли БК и органических веществ. Недавно было предложено сокращение ВС в качестве осуществимой меры для замедления глобального потепления при одновременном улучшении качества воздуха (UNEP, 2011). Однако эффективность таких потенциальных мер по замедлению глобального потепления зависит от степени воздействия ВС на климат, которая весьма неопределенна (Koch *et al.*, 2009; Виньяти *et al.*, 2010).

Также растет интерес к климатической роли компонентов природного аэрозоля и к тому, как она изменится в сочетании с загрязнением. Как обсуждалось ранее, было показано, что загрязнение более эффективно влияет на климат в "чистых" регионах.

Стивенс и Файнголд (2009) предполагают, что воздействие аэрозоля на облака и преципитацию почти наверняка зависит от режима. Далее они заявляют, что необходимы дополнительные исследования, чтобы определить, как след взаимодействия аэрозоля, облака и осадков зависит от состояния системы, и улучшить представление таких режимов облачности в моделях.

Поддержание и расширение возможностей наблюдений может улучшить наше понимание воздействия аэрозолей на климат. В этом отношении наземные и вертикальные профили химического состава аэрозолей с разделением по размерам, концентрации CN и CCN, AOD и SSA наблюдения остаются бесценными. Спутниковые наблюдения с постоянно повышающимся качеством поисковых алгоритмов позволяют получить глобальное представление об аэрозолях и радиации в атмосфере.

Параллельно возможности моделирования продолжают совершенствоваться, и теперь несколько моделей включают в себя микрофизику аэрозолей с онлайн-расчетом химического состава окислителей и параметризацию взаимодействия аэрозоля и облака, которые могут учитывать новые знания, полученные в ходе крупных экспериментальных кампаний, где это возможно.

Список литературы

- Акер Дж.Дж. и Лептух Г. (2007) Онлайн-анализ расширяет возможности НАСА в области науки о Земле. данные. *Eos, Транзакции Американского геофизического союза*, **88**(2), 14 -17.
- Аккерман, А.С., Мультишка, О.В., Stevens, D.E., *et al* . (2000) Уменьшение облачности в тропиках за счет сажи. *Наука*, **288**, 1042 - 1047, doi: 10.1126/наука.288.5468.1042.
- Альбрехт Б.А. (1989) Аэрозоли, микрофизика облаков и фракционная облачность. *Наука*, **245**, 1227 -1230.
- Бугиатиоти, А., Ненес, А., Фонтукис, С. *et al.* (2011) Распределения CCN с разрешением по размеру и кинетика активации старого континентального и морского аэрозоля. *Химия атмосферы и Физика*, **11**, 8791-8808. doi: 10.5194/аср-11-8791-2011. Чин, М., Кан, Р.А., Ремер, Л.А. *et al.* (2009) *Свойства атмосферного аэрозоля и климат-воздействие, синтез и оценка продукта 2.3, подготовленный Научной программой США по изменению климата и Подкомитетом по исследованию глобальных изменений*, стр. 115.

- Демотт, П.Дж., Сассен, К., Поэлло, М.Р. *et al.* (2003) Африканские пылевые аэрозоли как атмосферные частицы ядра льда. *Письма о геофизических исследованиях*, **30**(14), 1732. doi: 10.1029/2003GL017410.
- Фаунтукис С., Рийпинен И., Денне ван дер Гон Х.А.К. *et al.* (2012) Моделирование ультрадисперсных частиц образование частиц в Европе с использованием регионального СММ: вклад первичных выбросов по сравнению с вторичным образованием в количество аэрозолей. *Химия атмосферы и физика*, **12**, 8663 - 8677. doi: 10.5194/аср-12-8663-2012. Фаззи, С., Андреа, М.О., Хьюберт, Б.Дж. *et al.* (2006) Критическая оценка текущего состояния научных знаний, терминологии и потребностей в исследованиях, касающихся роли органических аэрозолей в атмосфере, климате и глобальных изменениях. *Химия атмосферы и Физика*, **6**, 2017-2038. doi: 10.5194/аср-6-2017-2006.
- Халлqvист М., Венгер Дж.К., Балтенспергер У. *et al.* (2009) Формирование, свойства и влияние вторичных органических аэрозолей: текущих и новых вопросов. *Атмосферное хим.- Мис и физики*, **9**, 5155 - 5236. doi: 10.5194/аср-9-5155-2009.
- Хейвуд Дж. и Буше О. (2000) Оценки прямого и косвенного радиационного воздействия из-за тропосферных аэрозолей: обзор. *Обзоры геофизики*, **38**, 513 - 543.
- Хилд, К.Л., Коу, Х., Хименес, Дж.Л. *et al.* (2011) Исследование вертикального профиля атмосферно-сферического органического аэрозоля: сравнение 17 авиационных полевых кампаний с глобальной моделью. *Химия и физика атмосферы*, **11**, 12673- 12696. doi: 10.5194/аср-11-12673- Хилд, К.Л., Джейкоб, Д.Дж., Парк, Р.Дж. *et al.* (2005) Крупный источник органического аэрозоля в свободной зоне в современных моделях отсутствует тропосфера. *Письма о геофизических исследованиях*, **32**, L18809. doi: 10.1029/2005GL023831.
- Хайнценберг Дж., Коверт Д. и Ван Дингенен Р. (2000) Распределение по размерам и химический состав состав морских аэрозолей: компиляция и обзор. *Теллус Б*, **52**, 1104- 1122.
- Им. У. и Канакиду М. (2012) Воздействие выбросов мегаполисов Восточного Средиземноморья на качество воздуха. *Химия и физика атмосферы*, **12**, 6335- 6355. doi: 10.5194/аср-12-6335-2012.
- Im, U., Markakis, K., Koçak, M. *et al.* (2012) Химический состав аэрозоля в летнее время в Восточном Средиземноморье и его чувствительность к температуре. *Атмосферная среда*, **50**, 164-173. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.12.044.
- Форстер П., Рамасвами В., Артаксо П. *et al.* (2007) Изменения в компонентах атмосферы и в радиационном воздействии, в *Изменение климата 2007: основы физической науки. Вклад Рабочей группы I в Четвертый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата* (ред. С. Соломон, Д. Кин, М. Мэннинг *et al.*), Кембридж, Издательство университета, Кембридж, Нью-Йорк, стр. 129-134. Канакиду М., Сайнфелд Дж.Х., Пандис С.Н. *et al.* (2005a) Органический аэрозоль и глобальный климат-математическое моделирование: обзор. *Химия и физика атмосферы*, **5**, 1053 - 1123.
- Канакиду М., Цигаридис К., Дентенер Ф.Дж. *et al.* (2005b) *Частицы человеческого происхождения Тушение естественного солнечного излучения в климатических системах - PHOENICS Synthesis and Отчет по интеграции*, Критский университет, Греция, ISBN 960-88712-0-4, 2005. Канакиду М., Дуче Р.А., Просперо Дж., Бейкер А.Р., *et al.* (2012) Атмосферный потоки органических N и P в мировой океан. Глобальные биогеохимические циклы, 10.10.1029/2011GB004277. Каридис, В.А., Кумар, П., Барахона, Д. *et al.* (2011) О влиянии пылевых частиц на глобальные показатели ядра конденсации облаков и количество облачных капель. *Журнал геофизических исследований*, **116**, D23204. doi: 10.1029/2011JD016283.

Koch, D., Schulz, M., Kinne, S. *et al.* (2009) Исправление к "Оценке содержания черного углерода в глобальных аэрозольных моделях". *Химия и физика атмосферы*,

, **10** 79-81. Koch, D., Schulz, M., Kinne, S.

et al. (2010)

Исправление к "Оценке выбросов черного углерода в глобальных аэрозольных моделях". *Химия и физика атмосферы*, **9**, 9001-9026. doi: 10.5194/asr-10-79-2010. Кумар П. капель

для глобальных и региональных моделей: включая активацию адсорбции из нерастворимого CCN. *Химия и физика атмосферы*, **9**(7), 2517-2532. doi: 10.5194/asr-9-2517-2009.

Кумар П., Соколик И.Н. и Ненес А. (2011) Активность ядер конденсации облаков и

кинетика активации капель свежих необработанных образцов региональной пыли и минералов. *Химия и физика атмосферы*

2011. , **11**(7), 3527-3541. doi: 10.5194/asr-11-3527- Ли, Ю.Х. и Адамс,

П.Дж. (2010) Оценка распределения аэрозоля в ГИСС-ТОМАСЕ

глобальная микрофизическая модель аэрозоля с данными наблюдений дистанционного зондирования. *Химия и физика атмосферы* , **10**, 2129-2144. doi: 10.5194/asr-10-2129-2010.

Левин З., Теллер А., Ганор Э. и Инь Ю. (2005) О взаимодействии минеральной пыли, морской-

частицы соли и облака: исследование измерений и моделирования в

рамках средиземноморской израильской кампании экспериментов с геофизических исследований , **110**, D20202. doi: 10.1029/2005JD005810. Ломанн, У. (2009) Облака морского

пограничного слоя в *Поверхностный океан - Нижние слои атмосферы*

Процессы, Серия геофизических монографий, том.

187 (ред. К. Ле Кере и Э.С. Зальтц-

мэн), твердый переплет, стр. 350. ISBN: 978-0-87590-477-1., код AGU GM1874771.

Мегаритис А.Г., Фаунтукис К., Харалампидис П.Э. *et al.* (2013) Реакция мелких частиц-

концентрации твердых веществ на изменения выбросов и температуры в Европе. *Химия и физика атмосферы* , **13**, 3423-3443. doi: 10.5194/asr-13-3423-2013.

Мещер С.М., Дентенер Ф.Дж., Джойкен А. *et al.* (2002) Разделение газа / аэрозоля

II: результаты глобального моделирования. *Журнал геофизических исследований*, **107**, D16. doi: 10.1029/2001JD001103. Мур

P.X., Каридис В.А., Кэппс С.Л. *et al.* (2013) Прогноз количества капель неопределенной-

связи от CCN: комплексная оценка с использованием наблюдений и глобальной

сопряженной модели. *Химия и физика атмосферы*, **13**, 4235-4251. doi: 10.5194/asr-13-4235-2013.

Майре Г., Самсет Б.Х., Шульц М. *et al.* (2013) Радиационное воздействие прямого аэрозоля

эффект, полученный в результате моделирования фазы II AeroCom. *Дискуссии по химии и физике атмосферы* , **13**, 1853 - 1877. doi: 10.5194/asr-13-1853-2013 .

Мирикокефалитакис, С., Цигаридис, К., Михалопулос, Н., Скиаре, Дж., Ненес, А., Кавамура, К.,

Сегерс А., Канакиду М. (2011) Образование оксалатов в

облаках в глобальной тропосфере: исследование. *Химия. Физика* , **11**, 5761-5782. doi: 10.5194/asr-11-5761-

трехмерного моделирования. 2011. Ненес А., Ган С., Абдул-Раззак Х.

et al.(2001) Кинетические ограничения для облачных капель

образование и влияние на альbedo облаков. *Tellus B*, **53**, 133-149.

Петтерс, М.Д. и Крейденвейс, С.М. (2007) Однопараметрическое представление гигроскопии-

рост плотности и активность ядер конденсации облаков. *Химия атмосферы*

и физика, **7**, 1961-1971. doi: 10.5194/asr-7-1961-2007. Пинкус

Р. и Бейкер М.Б. (1994) Влияние осадков на восприимчивость к альbedo

природа облаков в морском пограничном слое, **372**, 250-252. doi: 10.1038/372250a0.

- Реддингтон, К.Л., Карслоу, К.С., Спраклен, Д.В. *et al.* (2011) Первичный и вторичный вклад в количество частиц в европейском пограничном слое. *Химия и физика атмосферы*, **11**, 12007-12036. doi: 10.5194/asr-11-12007-2011. Сайнфелд, Дж.Х. и Пандис, С.Н. (1998) *Химия и физика атмосферы: от загрязнения воздуха к изменению климата*, John Wiley & Sons, Inc., Нью-Йорк.
- Шинделл, Д.Т., Ламарк, Дж.-Ф., Шульц, М. *et al.* (2013) Радиационное воздействие в ACCMIP моделирование климата в прошлом и будущем. *Химия и физика атмосферы*, **13**, 2939- 2974. doi: 10.5194/asr-13-2939-2013. Соломос
- С., Каллос Г., Кушта Дж. *et al.* (2011) Комплексное моделирование воздействия частиц минеральной пыли и морской соли на облака и осадки. *Химия атмосферы и Физика*, **11**, 873-892. doi: 10.5194/asr-11-873-2011. Сорошиан А., Файнголд Г., Лебсок М.Д. *et al.* (2009) О восприимчивости облаков к атмосферным воздействиям. - способность облаков к аэрозольным возмущениям. *Письма о геофизических исследованиях*, **36**, L13803. doi: 10.1029/2009GL038993.
- Спраклен Д.В., Карслоу К.С., Мериканто Дж. *et al.* (2010) Объяснение глобальной поверхности количественные концентрации аэрозолей с точки зрения первичных выбросов и образования частиц. *Химия и физика атмосферы*, **10**, 4775-4793. doi: 10.5194/asr-10-4775-2010.
- Спраклен, Д.В., Карслоу, К.С., Пешл, У. *et al.* (2011) Глобальные ядра конденсации облаков под влиянием углеродсодержащего аэрозоля горения. *Химия и физика атмосферы*, **11**, 9067-9087. doi: 10.5194 / asr-11-9067-2011.
- Стивенс Б. и Файнголд Г. (2009) Изучение воздействия аэрозоля на облака и осадки в буферизованной системе. *Природа*, **461**(1) 607-612. doi: 10.1038/nature08281.
- Текстор К., Шульц М., Гиберт С. *et al.* (2006) анализ и количественная оценка водоплавающих птиц жизненных циклов аэрозоля в "Аэроком". *Химия и физика атмосферы*, **6**, 1777-1813. doi: 10.5194 / asr-6-1777-2006.
- Цигаридис К. и Канакиду М. (2007) Значение вторичных органических аэрозолей в атмосфера будущего. *Атмосферная среда*, **41**, 4682 - 4692, doi: 10.1016 / j.atmosenv .2007.03.045. Цигаридис
- К., Даскалакис Н., Канакиду М., *et al* . (2013) Взаимное сравнение AeroCom упражнение по современному глобальному моделированию органических аэрозолей, будет представлено на сайте *Atmos. Chem. Phys.*, 2013.
- Туми, С. (1974) Загрязнение и альbedo планеты. *Атмосферная среда*, **8**, 1251- 1256.
- Доклад ЮНЕП и ВМО (2011 г.) О комплексной оценке содержания черного углерода и тропосферного Озон - Резюме для лиц, принимающих решения, UNEP/GC/26/INF/20.
- Виньяти Э., Карл М., Крол М. *et al.* (2010) Источники неопределенностей при моделировании черного цвета углерод в глобальном масштабе. *Химия и физика атмосферы*, **10**, 2595-2611. doi: 10.5194/asr-10-2595-2010.

Загрязнение воздуха и здоровье и роль аэрозолей

Пэт Гудман¹ and Otto Hänninen²

¹ Школа физики, Институт наук о здоровье окружающей среды, Дублинский институт
Технология, Ирландия

² Факультет наук об окружающей среде, Университет Восточной Финляндии, Финляндия

9.1 Предыстория

В этой главе исследуется литература на предмет доказательств неблагоприятных последствий для здоровья, связанных с воздействием загрязнения воздуха, и, в частности, связанного с этим диапазона размеров загрязняющих частиц. В частности, мы обсуждаем фактические данные, связывающие воздействие аэрозолей с неблагоприятными последствиями для здоровья. Хотя имеются значительные доказательства, касающиеся неблагоприятных последствий для здоровья работников определенных отраслей промышленности, в этой главе основное внимание уделяется последствиям для населения в целом. Представить всеобъемлющий обзор всех работ, посвященных аэрозолям и здоровью, невозможно; огромное количество оригинальных работ отражает как важность, так и проблемы в этой области исследований. Наша цель - дать обзор основных выводов и текущего понимания взаимосвязи аэрозолей, особенно ультрадисперсных частиц, со здоровьем населения в целом. Вполне могут быть и другие статьи, которые не цитируются, но которые дают аналогичные результаты: было бы невозможно привести все соответствующие публикации в рамках этой главы. Институт воздействия на здоровье (HEI) провел экспертный обзор состояния знаний о сверхдисперсных частицах (UFP) и здоровье, который по своей природе является более подробным, чем обзор, представленный здесь (HEI, 2013).

Роль загрязнения воздуха твердыми частицами и его связь с неблагоприятными для здоровья последствиями, такими как рост заболеваемости и смертности, хорошо документированы. Экстремальные явления загрязнения в Доноре, Пенсильвания, в 1948 году (Снайдер, 1994) и в Лондоне, Великобритания

в 1952 году (HMSO, 1954) были связаны со многими тысячами избыточных смертей и привели к осознанию того, что необходимы действия по снижению уровня загрязнения воздуха. Фактически, на протяжении всей истории существуют упоминания о случаях загрязнения воздуха, связанных с неблагоприятными последствиями для здоровья. В своей превосходной книге по истории загрязнения воздуха Бримблкомб (1988) ссылается на документацию о неблагоприятных последствиях для здоровья на протяжении веков, большинство из которых связано с сжиганием угля. Бримблкомб очень четко иллюстрирует свидетельства, полученные во многих разных странах за последние несколько тысячелетий.

Текущие исследования показывают, что даже при низких уровнях загрязнения неблагоприятные последствия для здоровья могут быть обнаружены у населения в целом. Один из ключевых документов известен как "Гарвардское исследование шести городов" (Dockery *et al.*, 1993), который показал, что ожидаемая продолжительность жизни была самой низкой в наиболее загрязненном городе и самой высокой в наименее загрязненном. Длительное воздействие твердых частиц, загрязняющих воздух, было связано с хроническими последствиями для здоровья, в то время как события в Лондоне и Пенсильвании, а совсем недавно и Дублине (Келли и Клэнси, 1984), демонстрируют немедленные или острые последствия для здоровья. Интересно, что когда происходит событие загрязнения, а затем загрязнение рассеивается, есть свидетельства того, что воздействие этого воздействия на здоровье продолжается (Белл и Дэвис, 2001; Гудман, Клэнси и Докери, 2004).

За последние несколько десятилетий загрязнение воздуха твердыми частицами измерялось как "чернота" материала, осевшего на фильтре (Британский институт стандартов, 1969). Эта система идеально подходила для измерения загрязнения в результате сжигания угля и выбросов дизельного топлива. У него был обрезанный размер $\approx 4,5$ мкм (Макфарланд, Ортиз и Роудс, 1982). Хотя, исходя свет reflectance-попробовать, эта система произвела уровень загрязнения в микрограммах на кубический метр, при этом конверсии фактор был применен к рефлектометрии значение. Европейский союз (ЕЕС, 1980) принял аналогичную систему измерения твердых частиц (ТЧ) и диоксида серы.

Этот тип измерения в настоящее время заменен методами, которые измеряют массу частиц на основе различных предельных значений размера, при этом воздух пропускается через фильтр, а масса материала собирается и измеряется. Измеряемые параметры обозначаются как PM_{10} и $PM_{2,5}$; оба они

в настоящее время законодательно закреплены Европейским союзом (EU, 2008; USEPA, 2012), а Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) определила для них руководящие значения (WHO, 1987, 2000, 2006). Эти предельные или рекомендуемые значения установлены в целях защиты здоровья человека.

Руководящие принципы ВОЗ по качеству воздуха основаны на систематическом обзоре научных данных о связи между уровнем загрязнения окружающей среды и результатами для здоровья больших групп населения. За последнее десятилетие достоверность таких фактических данных возросла, и, в частности, с воздействием ТЧ стало ассоциироваться больше конечных точек (WHO, 2013).

9.2 Фракции по размеру

В исследованиях на состояние здоровья частицы размером 2,5 - 10,0 мкм (измеряются как разница $PM_{10} - PM_{2,5}$) обозначаются как *крупная фракция*, частицы размером менее 2,5 мкм

обозначаются как *тонкая фракция* а частицы размером менее 0,1 мкм называются *ультрадисперсная фракция*. Следует отметить, что PM_{10} на самом деле также содержит $PM_{2,5}$ и UFPs, и аналогично $PM_{2,5}$ также содержит ультрадисперсную фракцию. Все эти фракции твердых частиц в атмосфере состоят из аэрозоля.

С точки зрения физики окружающей среды, когда речь заходит об этих частицах очень маленького размера, масса частиц может быть не самой подходящей метрикой для использования, поскольку могут возникнуть проблемы

быть многими тысячами мелких частиц, которые в совокупности имеют ту же массу, что и одно большое пылинку или площадь поверхности могут быть более подходящими показателями.

Однако, как уже упоминалось, действующее законодательство о качестве воздуха определяет использование только массы ТЧ в качестве утвержденных показателей.²⁵

Доступность методов подсчета количества частиц для использования в исследованиях здоровья все еще довольно ограничена, и выбор места мониторинга очень важен и может демонстрировать большую вариабельность, чем измерения ТЧ в данном городском районе (Aalto *et al.*, 2005). Пекканен и Кулмала (2004) также сообщают, что мониторинг центральной площадки может дать несколько худший показатель воздействия на человека UFPS, чем воздействия ТЧ.

9.3 Какие размеры частиц загрязняющих веществ важны?

Загрязнение воздуха может представлять собой сложную смесь газов и частиц (т. е. сложных аэрозолей), причем состав во многом зависит от источников, будь то промышленные, транспортные или бытовые. Размер смеси частиц в воздухе может варьироваться на несколько порядков, обычно от нескольких нанометров до десятков микрометров в аэродинамическом диаметре, на 3-4 порядка в диаметре и, следовательно, на 9-12 порядков в объеме и массе. В связи с этим возникает вопрос о том, какие размеры частиц наиболее тесно связаны с неблагоприятными последствиями для здоровья: более мелкие аэрозольные частицы или крупная фракция? Тот факт, что загрязнение частицами в настоящее время контролируется с точки зрения массовой концентрации, основан на многочисленных доказательствах связи массовой концентрации и состояния здоровья. Однако связи между фракциями различного размера в смеси загрязняющих частиц могут весьма существенно различаться; например, Бугаард *et al.* (2010) сообщают, что средние концентрации UFP (концентрация количества) слабо связаны с ТЧ.¹⁰ и сажа. В своем обширном обзоре Поуп и Докери (2006) сообщают, что подавляющее большинство литературы предполагает, что именно fine и потенциально также UFP в наибольшей степени связаны с неблагоприятными последствиями для здоровья. Они сообщают, что люди, в большей степени подверженные загрязнению окружающего воздуха, испытывают больше последствий для здоровья органов дыхания и сердечно-сосудистой системы.

9.4 Какие последствия для здоровья связаны с воздействием загрязнения воздуха ?

Изначально предполагалось, что проблемы с дыханием будут найдены, чтобы быть основным медицинским эффектом загрязнения воздуха, и хотя это правда, есть убедительные доказательства, в литровых-температура, что воздействие загрязнения воздуха является также связан с неблагоприятными сердечно-сосудистой системы последствий, таких как инсульт, сердечные приступы и так далее. Есть также некоторые свидетельства того, что сердечно-диоваскулярные эффекты проявляются более незамедлительно, в течение нескольких часов или дней, в то время как респираторные эффекты возникают после более длительного воздействия, от нескольких дней до нескольких недель. Литература также предполагает, что те, у кого уже есть проблемы со здоровьем, более восприимчивы к воздействию загрязнения. Брук *et al.* (2010) представляют подробный обзор некоторых последствий для здоровья, связанных с воздействием обязательно к загрязнению твердыми частицами. По мере прохождения этой главы мы будем рассматривать как данные о воздействии аэрозолей в воздухе на органы дыхания и сердечно-сосудистую систему, так и разное время реакции, связанное с каждым результатом для здоровья.

9.5 Источники атмосферных аэрозолей

Аэрозоли часто образуются в результате процессов горения, будь то в автомобилях, бытовом отоплении и приготовлении пищи или даже из природных источников.

Частицы могут выбрасываться в атмосферу напрямую (например, выбросы сажи в результате процессов горения, песчаных бурь в пустыне), но значительная часть концентрации в окружающей среде образуется в атмосфере из газообразных прекурсоров в результате фото- и других химических реакций. Тремя наиболее распространенными компонентами, влияющими на эти процессы, являются сульфаты, нитраты и аммиак, хотя летучие органические соединения играют значительную роль в образовании вторичных органических аэрозолей.

Большинство наших стандартных методов измерения не позволяют различать источники аэрозолей, поэтому большинство исследований, связанных со здоровьем, были сосредоточены на представлении данных о массе и количестве аэрозолей. Франк *et al.* (2006) сообщают, что в городских районах UFP возникают главным образом из-за быстро растущего трафика, который является доминирующим источником на многих городских объектах.

9.6 Отложение частиц в легких

Если мы возьмем пример с табачным дымом, мы знаем, что дым преимущественно находится в диапазоне размеров аэрозолей, и хорошо известно, что люди, которые курят табак и другие запрещенные вещества, быстро испытывают "кайф", указывающий на то, что эти аэрозоли прошли через легкие и попали в кровоток.

Многие из ранних исследований аэрозолей проводились в Дублине, где Нолан и Поллак (Nolan, 1972) разработали счетчик ядер конденсации (CNC). Берк и Нолан (1955) сообщили, что количество аэрозолей, выдыхаемых человеком, меньше, чем количество, которое он вдыхает; частично эта разница объясняется процессами свертывания, но некоторые аэрозоли остаются "пойманными" в ловушку в организме.¹

Некоторые исследователи изучали отложение аэрозолей в здоровых и больных легких. Например, Виберт *et al.* (2006) сообщают о высокой задержке UFPs при незначительных различиях между здоровыми и больными легкими. Moller *et al.* (2008) показали незначительный клиренс UFP через 24 часа после воздействия; то есть частицы задерживаются в организме. Есть некоторые свидетельства того, что UFP может перемещаться в другие органы через кровь (Geiser and Крейлинг, 2010), но для более крупных частиц этого не наблюдалось, хотя механизмы в настоящее время недостаточно изучены.

Если мы сосредоточимся на области курения табака как на примере воздействия аэрозоля, то теперь мы знаем, что это основная причина заболеваний и смертности во всем мире, причем 95% случаев рака легких связаны с этим, а у курильщиков табака значительно больший риск многих аспектов сердечно-сосудистых заболеваний по сравнению с некурящими (Главный хирург США, 2006). Это иллюстрирует, что вдыхание аэрозолей - в данном случае продуктов сгорания табачного дыма - приводит к отложению части их количества в легких и кровотоке, где со временем они вызывают неблагоприятные последствия для здоровья. Конечно, не все аэрозоли будут связаны с такими неблагоприятными последствиями для здоровья, но это иллюстрирует эффективность проникновения аэрозолей глубоко в организм человека.

¹ Упомянув дублинскую группу, также интересно отметить, что они разработали ионизационную "дымовую сигнализацию", которая реагирует на аэрозоли в воздухе: несомненно, положительный результат для здоровья, который спас бесчисленное количество жизней.

В исследовательской литературе также имеются значительные доказательства того, что некурящие, подвергающиеся воздействию окружающего табачного дыма (ETS), также проявляют неблагоприятные последствия для здоровья, которые больше, чем у людей, не подвергающихся такому воздействию (Главный хирург США, 2006).

В своем недавнем обзоре запретов на курение Гудман *et al.* (2009) показали, что здоровье населения в целом улучшилось очень скоро после введения запретов, в основном в связи с уменьшением числа сердечно-сосудистых заболеваний. В этом обзоре рассматривались запреты на многих континентах и были получены стабильные результаты, свидетельствующие о том, что запреты на курение устранили воздействие курения на население в целом, когда он Гудман. *et al.* (2009) также сообщили, что в ряде исследований было отмечено улучшение состояния здоровья работников.

Когда человек вдыхает воздух, содержащий аэрозоли, должен произойти ряд событий, чтобы эти аэрозоли были связаны с неблагоприятными последствиями для здоровья: аэрозоли должны иметь возможность проникать в легкие, а попав туда, они должны либо откладываться, либо всасываться в кровоток. Прделана значительная работа международной комиссии по радиации защите (МКРЗ) на осаждение аэрозолей в легких человека, и фактически, разработанные им модели осаждения считаются окончательными моделями в этом отношении. Хотя МКРЗ изначально интересовалась осаждением радиоактивных частиц, результаты могут быть непосредственно перенесены на любой тип аэрозоля.

Модель ICRP для поглощения в зависимости от размера частиц была впервые опубликована в 1994 году. Эта модель делит дыхательные пути человека на три области (внегрудную, грудную и альвеолярную) и пять подобластей (рис. 9.1). Как показано на рисунках 9.2 - 9.4, более крупные частицы имеют более высокую вероятность отложения в области носа, а UFPS - в альвеолярной области. Однако даже супермикронные частицы обладают значительной эффективностью осаждения в альвеолярной области и, из-за их огромной массы по сравнению с ультрадисперсными, легко доминируют в массовом поглощении частиц даже в альвеолярной области. (Масса частицы размером 1 мкм в миллион раз больше массы частицы размером 10 нм при той же плотности. Часто UFP имеют более низкую плотность из-за их фрактальной формы.) UFP доминируют в количестве частиц, а также в количестве осажденных фракций во всех областях дыхательных путей.

Это предпочтительное осаждение по размеру частиц также имеет полезные применения при доставке лекарственных препаратов, о чем будет рассказано далее в этой главе.

Вернер Хофманн (2011) рассмотрел различные модели, разработанные для характеристики поглощения частиц в дыхательных путях человека, и показал, что, несмотря на существенные различия в формулировке моделей, различия между ними относительно скромны по сравнению с общей изменчивостью эффективности осаждения в зависимости от размера частиц.

9.7 Механизмы взаимодействия аэрозолей в организме человека

Механизмы, с помощью которых частицы аэрозоля взаимодействуют и вызывают неблагоприятные последствия для здоровья, четко не изучены. Коричневый *et al.* (2001) сообщают, что малотоксичные частицы, такие как полистирол, проявляют провоспалительную активность вследствие их большой площади поверхности, и они предполагают, что это один из способов, с помощью которых частицы вызывают неблагоприятные для здоровья последствия. Агаццо *et al.* (2008) сообщают, что в исследованиях на животных UFPS приводят к ингибированию противовоспалительной способности липопротеинов высокой плотности и усилению системного окислительного стресса, о чем свидетельствует значительное повышение уровня малонового диальдегида в печени и усиление регуляции генов антиоксидантов, регулируемых Nrf2, из чего они делают вывод, что UFPs

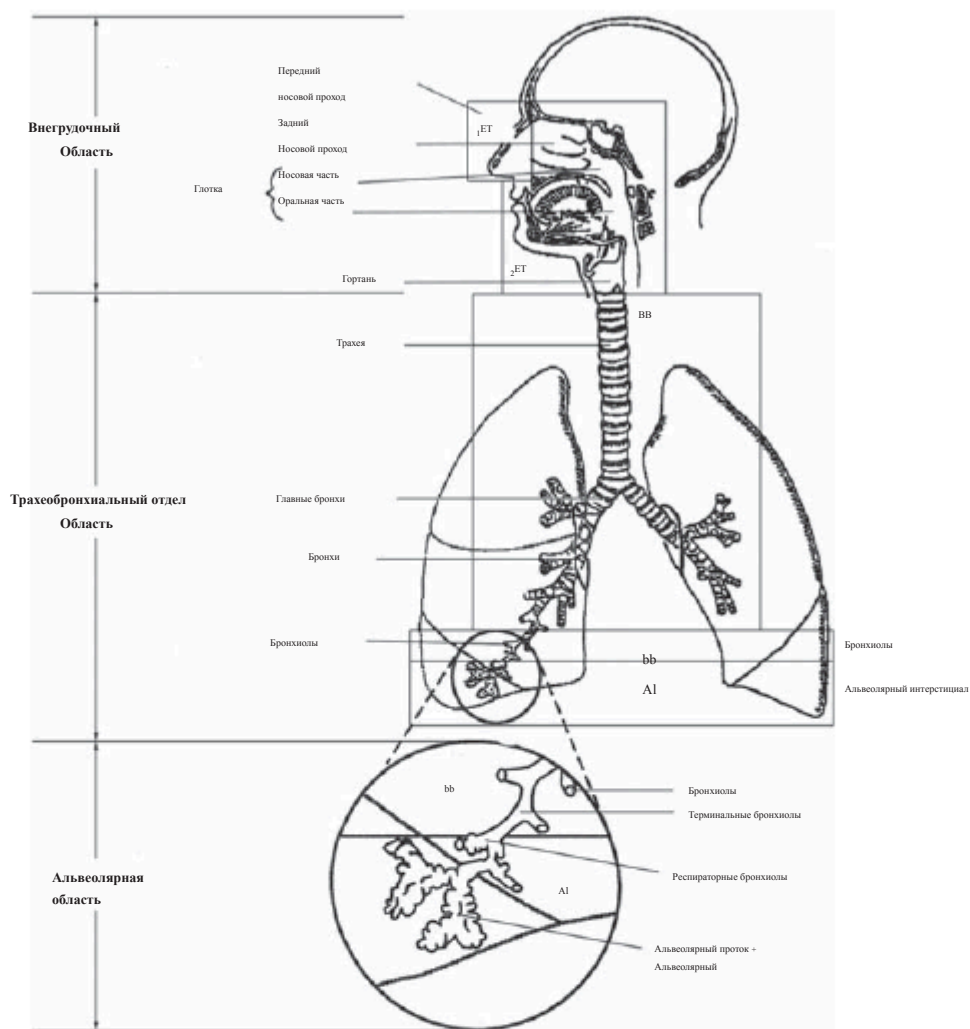
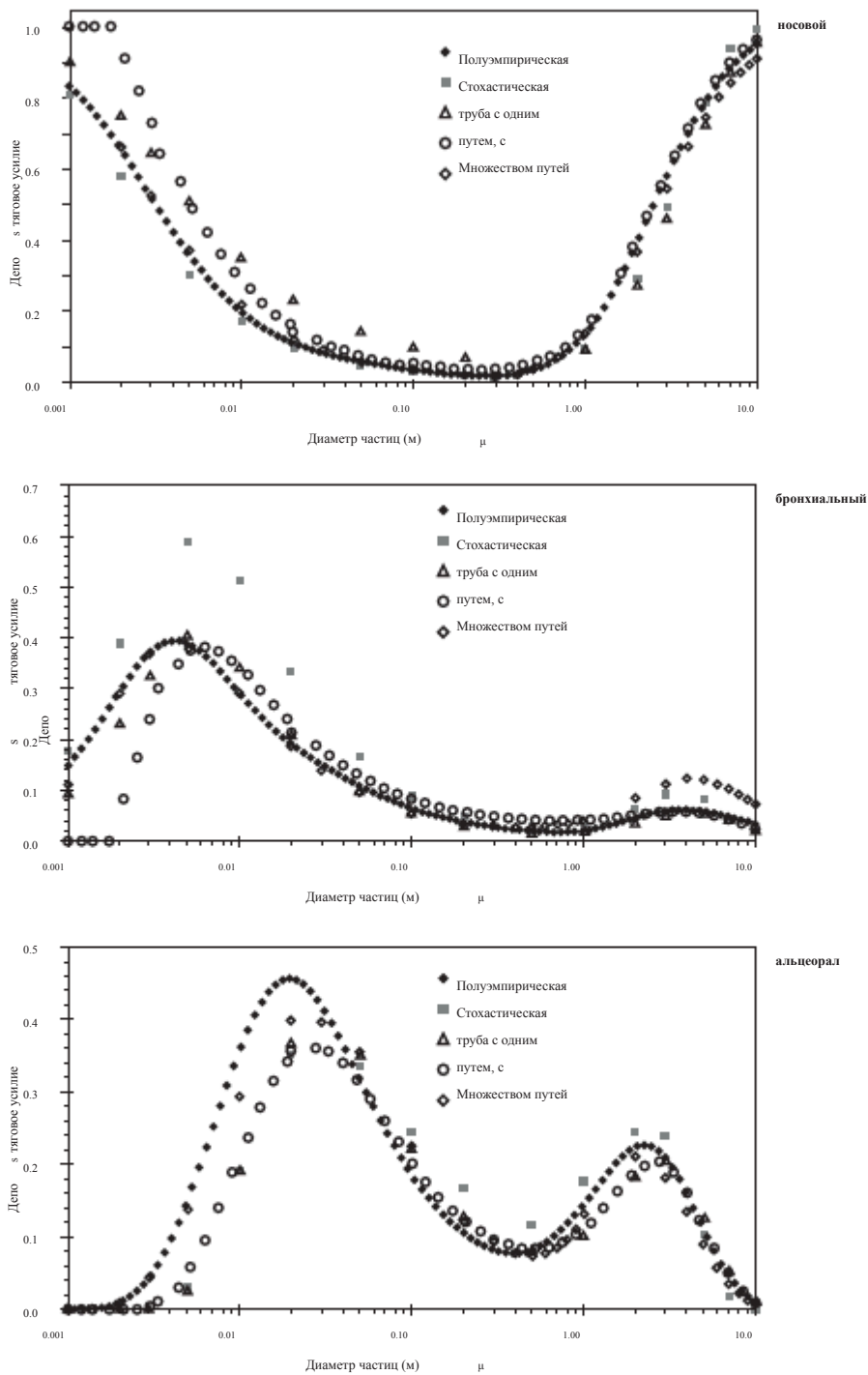


Иллюстрация основных анатомических областей дыхательных путей человека (ICRP), Рисунок 9.1 1994). ET1 - передние носовые ходы; ET2 - задние носовые ходы, носороглотка и гортань ; BB - бронхиальная область, включая трахею и бронхи; bb - бронхиолярная область, состоящий из бронхиол и терминальных бронхиол; AI, альвеолярно-интерстициальная область, состоящая из дыхательных бронхиол и альвеолярных протоков и мешочков, окруженных альвеолами. Перепечатано с сайта Hofmann (2011). Авторское право © 2011, с разрешения Elsevier.

концентрирует проатерогенное действие атмосферных ТЧ и может представлять собой значительный кардиоваскулярный фактор риска.

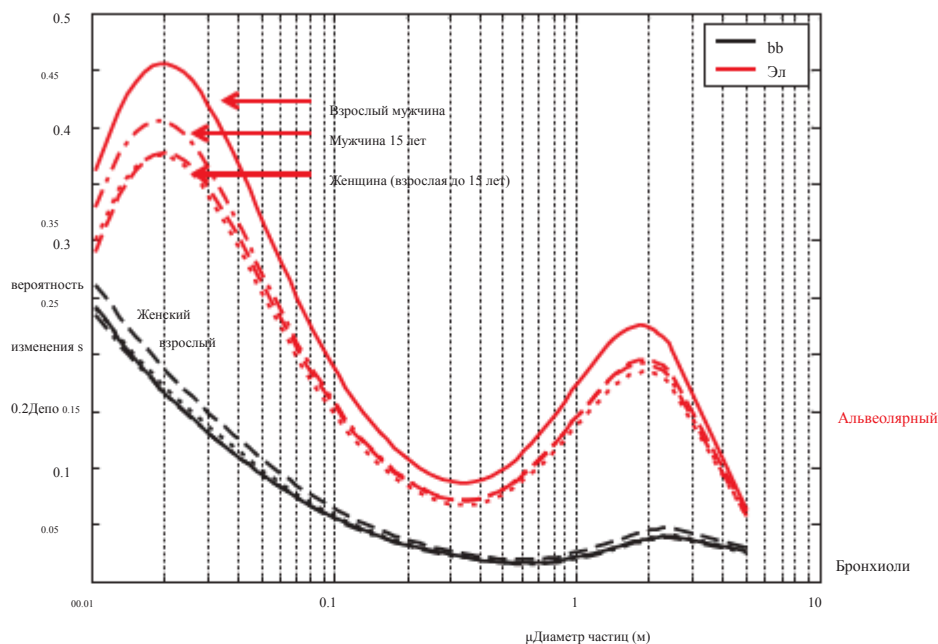
Песня *et al.* (2011) сообщают о значительных ассоциациях между концентрациями UFP и симптомами зуда у детей с atopическим дерматитом. Санноло, Ламберти и Педата (2010), в своем обзоре литературы, касающейся UFP и клеточных взаимодействий, сообщают, что *in vitro* токсикологические исследования показали, что UFPs вызывает несколько типов неблагоприятных клеточных эффектов, включая цитотоксичность, мутагенность, окислительное повреждение ДНК и стимуляцию продукции провоспалительных цитокинов. Eder *et al.* (2009) также предлагают некоторые механизмы, которые могли бы объяснить некоторые эффекты вдыхаемых частиц, такие как их активация и / или



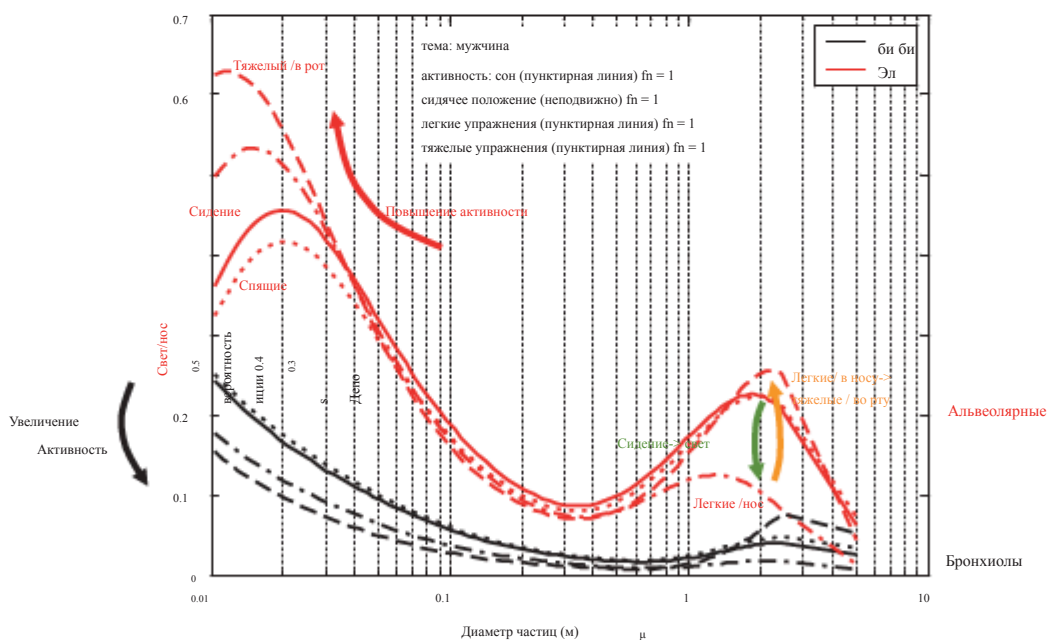
Сравнение пяти основных подходов к моделированию для оценки *respi*- Рисунок

9.2 поглощение частиц в пищеварительном тракте в зависимости от размера частиц.

Перепечатано из Hofmann (2011). Авторское право © 2011, с разрешения Elsevier.



Сравнение эффективности осаждения на альвеолах и бронхиолах у испытуемых **Рисунок 9.3** разного возраста в соответствии с моделью ICRP (1994).



Зависимость эффективности осаждения аэрозоля rag на альвеолах и бронхиолах- **Рисунок 9.4** изменяется по размеру в зависимости от уровня физической активности, согласно оценке модели ICRP (1994). Аэрозоль плотность: $1,5 \text{ г/см}^3$ соответствующий окружающей среде аэрозолями (Sorjamaa и Хянинен, 2011). Посмотреть раздел плиты для цветной версии.

возможности детоксикации вдыхаемых токсичных соединений. Alessandrini *et al.* (2006), проведя исследования воздействия, сообщают, что люди, чувствительные к аллергенам, могут быть более восприимчивы к пагубному воздействию UFPS. Поуп (2000) резюмирует полученные данные следующим образом: вызванное частицами воспаление легких, высвобождение цитокинов и измененная сердечная автономная функция могут быть частью патофизиологических механизмов или путей, связывающих загрязнение частицами с сердечно-легочными заболеваниями.

9.8 Респираторные исходы человека и воздействия аэрозоля

В этой главе мы исследуем литературы, относящихся к доказательствам или иным образом респираторных последствий воздействия аэрозольных частиц. Oberdorster *et al.* (1995) заключают, основываясь на исследованиях на животных, что, поскольку UFP всегда присутствуют в городской атмосфере, они играют определенную роль в возникновении острого повреждения легких у чувствительных подгрупп населения. Однако, напротив, Пекканен *et al.* (1997) обнаружили, что UFPS ничем не отличаются от PM₁₀ в их влиянии на дыхательную функцию у детей-астматиков, в то время как Петерс *et al.* (1997) сообщили, что UFPS были более тесно связаны с неблагоприятными изменениями в функции легких у взрослых, страдающих астмой.

Другое исследование, предоставляющее противоречивые данные, получено от Iskandar *et al.* (2012), воз сообщает, что крупные и мелкодисперсные частицы, но не UFP, являются причиной госпитализации по поводу астмы у детей.

В ходе многоквартирного исследования Каракацани *et al.* (2012) сообщили, что не было обнаружено последовательной связи между концентрациями мелкодисперсных частиц и воздействием на здоровье органов дыхания.

В целом, данные о влиянии аэрозоля на здоровье органов дыхания в связи с функцией легких противоречивы. Возможно, эффекта нет, или, если он и есть, что текущие исследования не смогли его обнаружить. Другим фактором в некоторых из этих исследований является то, что значительный процент исследуемой популяции астмы.

9.9 Сердечно-сосудистые исходы и воздействие аэрозоля

В исследовании гипертонического криза Франк *et al.* (2011) сообщили, что для UFP были обнаружены значительные эффекты с задержкой в два дня после воздействия, но что PM₁₀ и PM_{2.5} были обнаружены, но не PM_{2.5} и PM₁₀ в качестве доказательств 2.5 предполагает, что UFPS оказывают измеримое влияние на физиологические показатели, которые, как известно, изменяются в случаях острой сердечно-сосудистой патологии.

Аматулла *et al.* (2012) сообщают, что их результаты "указывают на то, что грубые и мелкодисперсные ТЧ влияют на функцию легких и чувствительность дыхательных путей, в то время как ультрадисперсные ТЧ могут нарушать функцию сердца". Это исследование подтверждает гипотезу о том, что грубые и мелкодисперсные ТЧ оказывают свое преимущественное физиологическое действие в месте отложения в дыхательных путях, тогда как ультрадисперсные ТЧ, вероятно, проникают через альвеолярный эпителиальный барьер в системный кровоток, влияя на функцию сердечно-сосудистой системы. "

В исследовании, проведенном в Бейджинге, Брайтнер *et al.* (2011) сообщили об увеличении сердечно-сосудистой смертности, связанной с концентрациями UFP, с задержкой в 2 дня, и что, в отличие от других показателей, связанных с частицами, связь с подсчетом количества UFP не зависела от происхождения воздушной массы.

Наиболее вероятно, что подсчет количества UFP является лучшим показателем местных источников. Cho *et al.* (2008) обнаружили аналогичные результаты в отношении смертности от сердечно-сосудистых и респираторных заболеваний в исследовании, проведенном в Сеуле, особенно среди пожилого населения.

Stolzel *et al.* (2007) обнаружили связь между концентрацией количества UFP и увеличением кардиореспираторной смертности в Эйфурте; отставание в этом случае составило 4 дня. Они не наблюдали никакого эффекта для массы UFP.

9.10 Выводы и рекомендации

Фактические данные свидетельствуют о том, что воздействие UFP и аэрозолей из окружающей среды связано с неблагоприятными последствиями для здоровья. Эти эффекты более выражены у лиц с уже существующими респираторными и сердечно-сосудистыми заболеваниями.

В случае сердечно-сосудистых исходов имеющиеся данные свидетельствуют о том, что острые побочные эффекты обнаруживаются в течение 2 дней после воздействия. В литературе имеется большое количество фактических данных о неблагоприятных последствиях для здоровья, связанных с длительным воздействием загрязнения воздуха, которые слишком обширны, чтобы приводить их здесь. Докери *et al* бумага с 1993 года и является одним из ключевых показателей-заданий, которые живут в местах с высоким загрязнением воздуха снижает продолжительность жизни. Недавно в Европе Ханниен и Кнол (2011) предположили, что воздействие частиц, переносимых по воздуху, является доминирующим источником экологического риска для здоровья населения Европы. Что касается последствий для здоровья респираторов, данные менее ясны. Показатель воздействия, который представляется наиболее важным при рассмотрении неблагоприятных последствий для здоровья, - это количество частиц в концентрации.

Поскольку в настоящее время нет законодательных требований по измерению количества UFP / аэрозолей концентрации в окружающем воздухе, количество исследований, связанных со здоровьем, несколько ограничено, и ни одно из них не доступно для больших групп населения, особенно по сравнению с количеством исследований, доступных в отношении обоих ТЧ^{2.5}

В настоящий момент ни ЕС, ни США руководящих принципов по качеству воздуха крышка воздействия УФПС/аэрозоли, и не дает директивы значения или какие-либо требования для измерения таких частиц-частиц в окружающем воздухе.

Мы рекомендуем проводить мониторинг количественных концентраций аэрозолей в окружающем воздухе, в идеале одновременно с другими измерениями. Это позволило бы разработать базу данных о концентрациях аэрозолей в окружающем воздухе и облегчило бы будущие исследования последствий такого воздействия для здоровья. Это также позволило бы разработать руководящие предельные значения.

Ссылки

- Aalto, P., Hämeri, K., Paatero, P. *et al.* (2005) Измерение количества аэрозольных частиц и концентрации-проверки в пяти европейских городах с использованием счетчика частиц конденсата TSI-3022 в течение трехлетнего периода в отношении воздействия загрязнения воздуха на здоровье восприимчивых групп населения. *Журнал Ассоциации по обращению с воздухом и отходами*, 55(8), 1064 - 1076.
- Alessandrini, F., Schulz, H., Takenaka, S. *et al.* (2006) Влияние ультрадисперсных частиц углерода-вдыхание при аллергическом воспалении легких. *Журнал аллергологии и клинической иммунологии*, 117(4), 824 - 830.

- Аматулла, Х., Норт, М.Л., Ахтар, США. *et al.* (2012) Сравнительный анализ сердечно-легочной системы воздействия взвешенных по размеру твердых частиц, находящихся в воздухе. *Токсикология при вдыхании*, **24** (3), 161-171.
- Араухо, Дж.А., Барахас, Б., Кляйнман, М. *et al.* (2008) Загрязнители окружающей среды в виде твердых частиц в ультрадисперсном диапазоне способствуют раннему развитию атеросклероза и системному окислительному стрессу. *Исследование кровообращения*, **102**, 589-596.
- Белл М.Л. и Дэвис Д.Л. (2001) Переоценка смертельного лондонского тумана 1952 года: новые показатели острых и хронических последствий острого воздействия загрязнения воздуха. *Перспективы охраны окружающей среды и здоровья населения*, **109** (Дополнение 3), 389-394.
- Бугаард Х., Монтань Д.Р., Бранденбург А.П. *et al.* (2010) сравнение краткосрочных воздействия частиц количество, PM10 и концентраций сажи на три (подпрограммы) городского лока-ций. *Наука общее среды*, **408**(20), 4403-4411. Брайтнер С., Лю Л., Сайрис Дж. *et al.* (2011) Загрязнение воздуха мелкими частицами на субмикрометровом уровне и смертность от сердечно-сосудистых заболеваний в Пекине, Китай. *Наука об общей окружающей среде*, **409**(24), 5196-5204.
- Бримблкомб, П. (1988) *Большой дым*, Ратлидж, Лондон, Нью-Йорк.
- Стандарт № 1747 Британского института стандартов 1969 года. *Методы измерения загрязнения воздуха*. Часть 2, *Определение концентраций взвешенных веществ* Институт Дарлс, Лондон. , Британский стандарт Stan-
- Брук, Р.Д., Раджагопалан, С., Поуп, С.А. III, *et al.* (2010) Загрязнение воздуха твердыми частицами и сердечно-сосудистые заболевания: обновление научного отчета Американской кардиологической ассоциации. *Циркуляция*, **121**, 2331-2378. Браун, Д.М., Уилсон, М.Р., Макни, У. *et al.* (2001) Зависящие от размера провоспалительные воздействия ультрадисперсных частиц полистирола: роль площади поверхности и окислительного стресса в усилении активности ультрадисперсных частиц. *Токсикология и прикладная фармакология*, **175**(3), 191-199.
- Берк, Т.П. и Нолан, П.Дж. (1955) Базовое содержание воздуха в жилых помещениях. *Геофизика Pura e Applicata*, **31**, 191-196.
- Чо, Ю.С., Ли, Дж. Т., Юнг, К.Х. *et al.* (2008) Взаимосвязь между концентрацией твердых частиц подтверждено оптическим счетчиком частиц и смертностью в Сеуле, Корея, в 2001 году. *Журнал Environmental Health*, **71**(2), 37-43.
- Докери, Д.У., Поуп, К.А. III, Сюй, Х. *et al.* (1993) Связь между загрязнением воздуха и смертность в шести городах США. *Медицинский журнал Новой Англии*, **329**, 1753-1759.
- Eder, C., Frankenberger, M., Stanzel, F. *et al.* (2009) Ультрадисперсные частицы углерода вливают на экспрессию CYP1B1 в моноцитах человека. *Токсикология частиц и волокон*, **6**, 27.
- ЕЕС 1980. Предельные значения качества воздуха и ориентировочные значения содержания диоксида серы и взвешенных веществ
- Директивы по твердым частицам 80/779/ЕЕС.
- EU 2008. Директива 2008/50/ЕС. О качестве окружающего воздуха и его чистоте для Европы.
- Франк У., Одех С., Виденсолер А. *et al.* (2011) Влияние размера частиц на сердечно-сосудистые заболевания - чем меньше, тем хуже. *Наука об общей окружающей среде*, **409**(20), 4217-4221. Франк У., Туч Т., Манджаррес М. *et al.* (2006) Субмикрометрические частицы внутри и снаружи помещений - уровни воздействия и эпидемиологическая значимость ("3 внутренних Ls"). *Токсичность окружающей среды*, **21**(6), 606-613.

Гейзер М. и Крейлинг В. Г. (2010) Осаждение и биокинетика вдыхаемых наночастиц.

Токсикология частиц и волокон, 2, 7

Гудман П.Г., Клэнси Л. и Докери Д. В. (2004) Смертность от конкретных причин и расширенные последствия загрязнения твердыми частицами и температурного воздействия. *Перспективы Охраны окружающей среды и здоровья*, 112(2), 179-185.

Гудман П.Г., Хоу С., Кабир З. и Клэнси Л. (2009) Есть ли польза для здоровья от- в соответствии с всеобъемлющими законами о запрете курения: обзор. *Международный журнал общественного здравоохранения*, 54, 367-378.

Отто Ханнинен и Энн Кнол (Ред.). EBoDE-Отчет. Экологические перспективы

Экологическое бремя болезней. Оценки по девяти факторам стресса в шести европейских странах . Национальный институт здравоохранения и социального обеспечения (THL), отчет 1/2011. ВУЗ (2013) Понимание воздействия ультрадисперсных частиц окружающей среды на здоровье Обзор вуза

Дискуссионная группа по ультрадисперсным частицам, ВУЗ, Бостон, Массачусетс.

HMSO (1954) Служба общественного здравоохранения Ее Величества. Смертности и заболеваемости в течение

Лондонский туман в декабре 1952 года. Здравоохранения и медицинской тематики отчет № 95. Ее Величества канцелярии, Лондон. Хофманн, У. (2011)

Моделирование отложения вдыхаемых частиц в легких человека - обзор.

Научный журнал по аэрозолям, 42, 693 - 724.

МКРЗ (Международная комиссия по радиологической защите) (1994) Модель дыхательных путей человека

. *Анналы МКРЗ*, 24, 1-482 <http://www.sciencedirect.com/science/journal/01466453>

(последнее обращение 9 августа 2013 г.). Искандар А., Андерсен

З.Дж., Беннеликке К. *et al.* (2012) Крупные и мелкодисперсные частицы, но не

ультрадисперсные частицы в городском воздухе вызывают госпитализацию детей с астмой. *Грудная клетка*, 67(3), 252-257.

Каракацани, А., Аналитис, А., Перифану, Д. *et al.* (2012) Загрязнение воздуха твердыми частицами

и респираторные симптомы у лиц, страдающих астмой или хронической обструктивной болезнью заболевание легких: европейское многоцентровое панельное исследование. *Здоровье окружающей среды*, 11, 75. Келли И. и Клэнси Л. (1984) Смертность в больнице общего профиля и загрязнение воздуха в городах. *Ирландский*

Медицинский научный журнал, 77, 322- 324.

Макфарланд, А.Р., Ортис, К.А. и Роудс, К.Э.н. (1982) Оценка британской аэродинамической трубы

Пробоотборник дымовой завесы. *Атмосферная среда*, 16(2), 325- 328.

Möller, W., Felten, K., Sommerer, K. *et al.* (2008) Отложение, удержание и транслокация

ультрадисперсных частиц из центральных дыхательных путей и периферии легких. *Американский журнал респираторной медицины и интенсивной терапии*, 177, 426-432.

Нолан, П.Дж. (1972) Фотоэлектрический счетчик ядер. Лекция о медали Бойля. *Продолжение-*

исследования Королевского Дублинского общества, Серия А, 4, 161- 180.

Обердорстер Г., Гелейн Р.М., Ферин Дж. и Вайсс Б. (1995) Связь между загрязнением воздуха твердыми частицами загрязнение воздуха и острая смертность: влияние ультрадисперсных частиц? *Ингаляционная Токсикология*, 7(1), 111- 124.

Пекканен Дж. и Кулмала М. (2004) Оценка воздействия ультрадисперсных частиц при эпи-эпидемиологии-

демологические исследования временных рядов. *Скандинавский журнал рабочей среды и здоровья*, 30(Suppl. 2), 9 - 18. Pekkanen,

J., Timonen, K.L., Ruuskanen, J. *et al.* (1997) Влияние ультрадисперсных и мелкодисперсных частиц-

в городском воздухе на максимальный объем выдоха у детей с симптомами астмы. *Исследование окружающей среды*, 74 (1), 24 -33.

- Питерс, А., Вихманн, Х.Э., Туч, Т. *et al.* (1997) Респираторные эффекты связаны с количеством ультрадисперсных частиц. *Американский журнал респираторной и реанимационной помощи Медицина*, **155**(4), 1376 - 1383. Поуп, С.А. III., (2000) Что эпидемиологические данные говорят нам о воздействии окружающей среды на здоровье человека-органические аэрозоли? *Научный журнал по аэрозолям*, **13**(4), 335 -354.
- Папа Римский, С. А. и Докери, В. Д. (2006) воздействие на здоровье загрязнение воздуха твердыми частицами: линии что подключить. *Журнал Ассоциации по обращению с воздухом и отходами*, **56**, 709 -742.
- Санноло, Н., Ламберти, М. и Педата, П. (2010) Воздействие ультрадисперсных частиц на здоровье человека. *Giornale Italiano di Medicina del Lavoro ed Ergonomia's*, **32**(4 Дополнение), 348-351.
- Снайдер Л.П. (1994) "Смертоносный смог над Денвером, Пенсильвания": промышленный воздух загрязнение, политика общественного здравоохранения и политика экспертизы. *Обзор экологической истории* , **18** (1), 117- 139. Сонг С., Ли К., Ли Ю.М. *et al.* (2011) Острое воздействие на здоровье городских мелких и ультрадисперсных частиц на детей с атопическим дерматитом. *Экологические исследования* , **111**(3), 394-399.
- Сорджамаа Р. Ханнинен О. (2011) Моделирование воздействия частиц и доз: разработка и валидация модели микроэкологии с разбивкой по размерам. *TRANSPHORM* Результаты D2.5.2. Куопио, Финляндия, декабрь 2011 г., 71 стр. Штельцель М., Брайтнер С., Сайрис Дж. *et al.* (2007) ежедневная смертность и твердых частиц в диф-размерных классов различны в Эрфурте, Германия. *Журнал экспозиции науки и экологической эпидемиологии*, **17**, 458 - 467. USEPA (2012) Национальные стандарты содержания твердых частиц в воздухе, <http://www.epa.gov/air/criteria.html> (последнее обращение 9 августа 2013 г.).
- Главный хирург США (2006) Последствия недобровольного воздействия табака на здоровье Курение: Отчет Главного хирурга США, Департамента здравоохранения и социальных услуг, Управления по борьбе с курением и здоровью CDC., опубликованный в журнале. Wiebert, P., Sanchez-Crespo, A., Seitz, J. *et al.* (2006) Незначительный клиренс ультрадисперсных частиц частицы остаются в здоровых и пораженных легких человека. *Европейский респираторный журнал*, **28**(2), 286 - 290. Вейхенталь, С. (2012) Выбранные физиологические эффекты ультрадисперсных частиц при острых сердечно-сосудистых заболеваниях-сосудистая заболеваемость. *Экологические исследования* , **115**, 26 - 36.
- ВОЗ (1987) *Руководящие принципы по качеству воздуха для Европы*, Европейская серия, Т. 23, Всемирная организация здравоохранения Организация, Европейское региональное бюро, Копенгаген.
- ВОЗ (2000) *Руководящие принципы по качеству воздуха для Европы*, Европейская серия, Т. 91, 2- е изд., Мир Организация здравоохранения, Европейское региональное бюро, Копенгаген <http://www.euro.who.int/документ/e71922.pdf> (последнее обращение 9 августа 2009 г.). ВОЗ (2006) Руководящие принципы Всемирной организации здравоохранения по качеству воздуха, глобальное обновление 2005 г., Копенгаген, 484 стр.
- ВОЗ (2013). Европейское региональное бюро ВОЗ. Обзор фактических данных по аспектам здравоохранения. о загрязнении воздуха -REVIHAAP: первые результаты, Всемирная организация здравоохранения, Копенгаген, http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0020/182432/e96762-final.pdf (последнее обращение 9 августа 2013 г.).

Фармацевтические аэрозоли и Доставка лекарств в легкие

Дарра Марнейн¹, Виктория Хаттер¹, и Мари Харанг²

¹ Фармацевтический факультет Хартфордширского
университета, Великобритания
² Институт фармацевтических наук, Королевский колледж Лондона, Великобритания

10.1 Введение

Доставка лекарств - это наука о целенаправленном введении лекарств в требуемое место фармакологического действия. Легкие легко идентифицируются как орган-мишень для доставки лекарств, благодаря (относительной) легкости доступа во время вдоха. Привлекательным вариантом является локальная доставка лекарственных средств, таких как бронхолитики, кортикостероиды и противомикробные средства, непосредственно к месту их действия в дыхательных путях. Такая локализованная местная доставка препарата максимизирует фармакологический эффект препарата, ограничивая системное воздействие и, как следствие, побочные эффекты. Доставка препарата в легкие - явление отнюдь не недавнее. Еще 4000 лет назад древние индейские племена вдыхали пары для лечения закупорки дыхательных путей (Кромптон, 2006). Легкие также долгое время использовались в качестве системного портала для молекул лекарств, хотя и не всегда законно или терапевтически, как продемонстрировано открытием табачных трубок, датируемых около 2000 лет назад в Южной Америке, и китайских ингаляторов для опиума (Sanders, 2007).

Основная физиологическая функция легких заключается в обеспечении газообмена через альвеолы в систему кровообращения. Анатомические характеристики, которые эволюционировали для достижения газообмен обусловлен большой площадью поверхности (100 м² у взрослого человека) и тонкий эпителиальный барьер (обычно 1 мкм) с обширной васкуляризацией (Мацукава *et al.*, 1997; Scheuch *et al.*, 2006). Обширный капиллярный кровоток альвеолярной области путь введения лекарственного средства, представляющий собой обширный и очень быстрый

способность поглощать экзогенные химические вещества, включая макромолекулы, такие как инсулин (Паттон, Букар и Элдон, 2004; Rave *et al.*, 2005). Аэрозоли с мелкодисперсными частицами широко распространены в окружающей среде. Чтобы поддерживать газообмен, легкие оснащены защитными механизмами, которые исключают попадание загрязняющих веществ по воздуху, таких как пыль и дым. Как первоначально было предложено Вайбелем (Weibel, 1963), в настоящее время широко признано, что дыхательные пути, через которые втягивается вдыхаемый воздух, разветвляются, меняют направление и уменьшаются в диаметре в 23 раза, прежде чем воздух достигнет альвеолярного эпителия (рис. 10.1). Разветвление дыхательных путей и высокая турбулентность в верхних дыхательных путях влияют на отложение вдыхаемых аэрозолей на стенках дыхательных путей с последующим удалением частиц, достигаемым за счет защитных механизмов, таких как растворение (если оно растворимо), кашлевой рефлекс и мукоцилиарный клиренс (Stahlhofen, 1980; Scheuch *et al.*, 2008) или активность макрофагов (Brain, 1988) для плохо растворимых аэрозолей. Отложение частиц в дыхательных путях, хотя и является препятствием для достижения системной доставки лекарств, является эффективным средством достижения локализованной терапии заболеваний легких, таких как астма, хроническая обструктивная болезнь легких (ХОБЛ) и муковисцидоз (МВ).

Доставка лекарственного средства в легкие наиболее эффективно достигается при введении фарм аэрозолей. За последние 15 лет были достигнуты значительные успехи в производстве ингаляционных средств, и текущие исследования направлены на изучение влияния физико-химических свойств вдыхаемых аэрозолей на взаимодействие с эпителиальным слоем легких. По-прежнему необходимо производить стабильные продукты, которые воспроизводимо генерируют аэрозоли, пригодные для

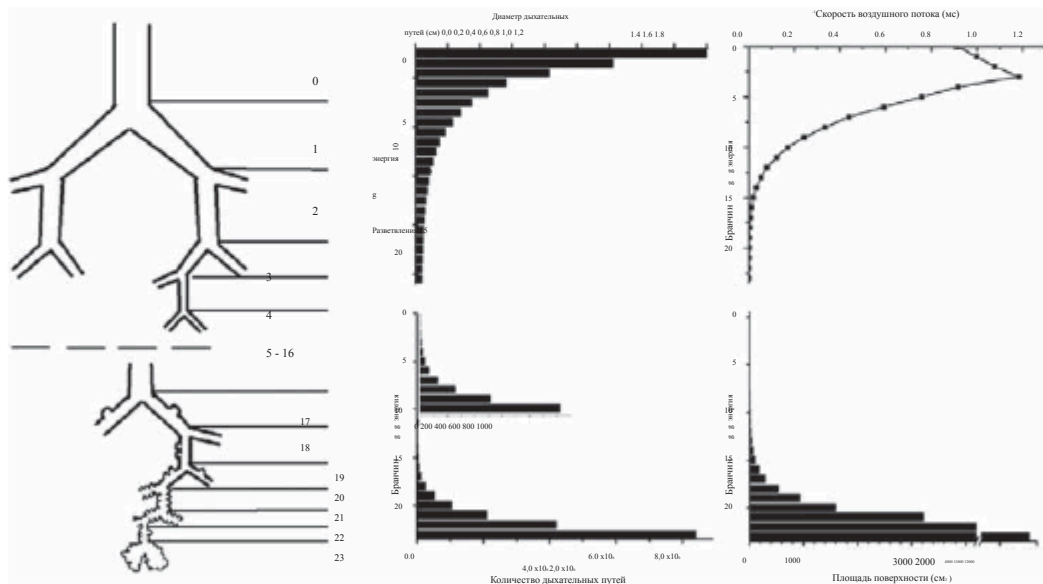


Схема анатомии легких в соответствии с моделью Вейбеля **Рисунок 10.1**

легкое. Поперечный диаметр дыхательных путей уменьшается (верхний левый график), но количество дочерних дыхательных путей (нижний левый график) увеличивается между трахеей и альвеолами. Следовательно, площадь поверхности поперечного сечения легких заметно увеличивается после поколения 17 (справа внизу) с сопутствующим снижением скорости воздушного потока (справа вверху). Скорость воздушного потока была рассчитана для условий сидячего образа жизни в соответствии с Martonen (1993), а морфометрические данные были взяты из Swift *et al.* (2007).

достижение отложения лекарственного средства. Поэтому, важно учитывать физико-химических проп- свойства лекарственного аэрозоля, которые определяют отложения, а также продукты, используемые пациентами для доставки аэрозоля.

10.2 Фармацевтические аэрозоли в лечении заболеваний

Для достижения газообмена на поверхности альвеол воздух втягивается в легкие при расширении грудной полости за счет сокращения диафрагмы и межреберных мышц. Верхние дыхательные пути служат для достижения фильтрации частиц за счет инерционного воздействия. Нижние дыхательные пути состоят из центральных проводящих дыхательных путей (которые согревают и увлажняют вдыхаемый воздух), охватывающих бронхи и бронхиолы, и периферических дыхательных путей, включающих терминальные и респираторные бронхиолы и альвеолы. Проводящие дыхательные пути состоят из мерцательного эпителия, который содержит выделяющие слизь бокаловидные клетки и покрыт двухслойным барьером над клетками: низковязким перилимфарным раствором, который покрыт высоковязкоупругим слоем слизистого геля (Satir and Sleight, 1990; Mathias, Yamashita and Lee, 1996). Альвеолы и нижние бронхиолы лишены слизи и имеют гораздо более плоский эпителий, состоящий из плоского типа клеток (Форбс, 2000), покрытый слоем пульсердечных ПАВ (Паттон, 1996). Таким образом, заболевания дыхательных путей проявляются в виде измененной анатомии дыхательных путей или патофизиологических изменений, таких как измененный клиренс слизи и пульмональная выработка сурфактанта. Местное легочное введение непосредственно в дыхательные пути является золотым стандартом лечения обструктивных заболеваний легких; он работает за счет максимального увеличения фармакологического потенциала препарата и ограничения системного воздействия и возникающих в результате этого побочных эффектов.

10.2.1 Астма

Астма - это хроническое заболевание проводящих дыхательных путей, наиболее очевидным симптомом которого является одышка и свистящее дыхание. Фактически, это заболевание является результатом хронического воспаления, затрагивающего клеточные и не клеточные воспалительные пути, что приводит к повышенной чувствительности бронхов и, в конечном итоге, к обструкции воздушного потока. Астма является важной мировой причиной смертности и заболеваемости; по оценкам, этим заболеванием страдают 300 миллионов человек, и все признаки указывают на рост глобальной распространенности (GINA, 2011). Действительно, ежегодно во всем мире 180 000 смертей связаны с астмой (Viegi, Annesi and Matteelli, 2003). В развитых странах, несмотря на растущую распространенность, фармакологические методы лечения эффективны в снижении смертности. Например, в Великобритании было подсчитано, что 5,2 миллиона человек живут с астмой (Asthma, 2004) и что из-за этого заболевания теряется 250 миллионов лет регулируемой продолжительности жизни (GINA, 2011).

Основой терапии астмы является лечение бронхоконстрикции, которая может быть легко достигается с помощью бронхолитиков, таких как β -агонисты (например, сальбутамол) и антимускариновые препараты (например, ипратропий), которые уменьшают одышку. Однако, также важно устранить причины бронхоконстрикции, а длительное воспаление и повышенную чувствительность лечить кортикостероидами (например, беклометазона дипропионат) или антагонистами лейкотриена (например, монтелукастом). В течение многих лет разработки в области терапии астмы вращались вокруг изменения физико-химических свойств молекул лекарственных средств с целью достижения более высокой эффективности (флутиказона пропионат), более длительного действия (формотерол и салметерол) или специфичности при

активность легких (циклесонид). Признано, что ингаляционная терапия обеспечивает превосходный контроль над симптомами астмы (Корриган *et al.*, 2009), но снижение функции легких все еще наблюдается у пациентов с астмой из-за отсутствия эффективного лечения для изменения ремоделирования легких, которое является результатом длительного воспаления в дыхательных путях (Hanania and Donohue, 2007).

10.2.2 Хроническая обструктивная болезнь легких

ХОБЛ охватывает широкий спектр заболеваний, характеризующихся хроническим ограничением воздушного потока, которое не является полностью обратимым. Истинное бремя ХОБЛ трудно установить из-за ряда сопутствующих заболеваний и трудностей в определении, но, по оценкам, в 2008 году было зарегистрировано около 3,28 миллиона смертей (Всемирная организация здравоохранения, 2011). Вдыхание твердых частиц (например, при курении или загрязнении окружающей среды) было связано с биохимическими изменениями, связанными с патологией ХОБЛ (Schwarze *et al.*, 2006) и, по оценкам, ХОБЛ станет третьей по значимости причиной смерти к 2020 году из-за воздействия твердых частиц в развивающихся странах и старения населения (Gartlehner *et al.*, 2006). ХОБЛ прогрессирует, и у пациентов, как правило, наблюдаются инфекционные обострения заболевания, требующие госпитализации. В большинстве случаев ХОБЛ протекает хронически. Совокупные прямые и косвенные затраты Национальной службы здравоохранения Великобритании на лечение ХОБЛ в 2005 году оценивались в 1 миллиард фунтов стерлингов в год, что оказывало существенное влияние на экономику в целом; например, в 1994-1995 годах из-за ХОБЛ было потеряно 21,9 миллиона рабочих дней (Национальный сотрудничающий центр по хроническим состояниям, 2004).

ХОБЛ сильно отличается от астмы тем, что основным местом ограничения воздушного потока являются мелкие периферические дыхательные пути (Burgel, 2011). ХОБЛ характеризуется обструктивным бронхитом и воспалением, определяемым по накоплению нейтрофилов и лимфоцитов (Hogg, 2004). Связанное с этим высвобождение кислородных радикалов, эластазы и нескольких цитокинов отвечает за повышенную секрецию слизи, индукцию разрушения внеклеточного матрикса паренхиматозных тканей и фиброз мелких дыхательных путей (Adcock, Caramori and Barnes, 2011). Современные фармакологические методы лечения ХОБЛ основаны на применении бронхолитиков, которые улучшают способность к вдоху, и обычно используются бронхолитики длительного действия, такие как фор-мoterол и салметерол. Бронходилататоры менее эффективны при ХОБЛ, чем при астме (Sturton, Persson and Barnes, 2008), но антимускариновые средства, такие как ипратропий (O'Donnell, Lam and Webb, 1999) и тиотропий длительного действия (Cooper, 2006), появились как фармакологический класс, который предлагает особые преимущества в улучшении одышки и переносимости физической нагрузки. Воспалительные пути в дыхательных путях при ХОБЛ отличаются от таковых при астме, и роль терапии кортикостероидами неоднозначна (Gartlehner *et al.*, 2006), возможно, из-за фенотипических различий при заболевании. Из-за роста глобальной заболеваемости ХОБЛ в ближайшие годы, вероятно, в клинику будут внедрены фармакологические средства с новым модифицирующим заболевание действием (Доннелли и Роджерс, 2008; Эддок, Карамори и Барнс, 2011).

10.2.3 Муковисцидоз

CF является наиболее распространенным генетически наследуемым заболеванием в белых популяциях, с частотой примерно 1 на 2500 новорожденных (Davies, Alton and Bush, 2007). Хотя MB является сложным полиорганным заболеванием, на заболевания легких приходится примерно 85% смертности (Flume *et al.*, 2007). CF - аутосомно-рецессивное заболевание, вызываемое мутациями в гене муковисцидозного регулятора трансмембранной проводимости при фиброзе (CFTR), который отвечает за перенос ClO^- и H_2O через апикальные мембраны легочного эпителия (Rowe, Miller and Sorscher,

2005). В результате нарушения транспорта хлоридов уменьшается объем жидкости, выстилающей дыхательный эпителий. Мукоцилиарный клиренс нарушается, поскольку микроцилии на поверхности клеток требуют наличия достаточного объема перилиарной жидкости (Satir and Sleight, 1990).

Прогрессирующее разрушение легких является результатом сгущения легочного секрета, бронхальной инфекции и чрезмерного воспаления в ответ на патогенные микроорганизмы и аллергены, которые невозможно удалить.

Лечение МВ требует физиотерапии для удаления слизи в дыхательных путях и укреплению респираторной мышечной силы (Приор, 1999). Однако часто требуется антибактериальная терапия для предотвращения инфекции и лечения обострений на ранних стадиях заболевания (в детском возрасте). Кроме того, полезна муколитическая терапия; в частности, аэрозольная терапия с использованием рекомбинантной ДНКазы человека получила консенсусное признание на практике (Flume *et al.*, 2007). Было продемонстрировано, что в настоящее время широкий спектр видов бактерий вовлечен в прогрессирование заболевания CF (Stressmann *et al.*, 2011), и окружающая среда пациента, по-видимому, играет определенную роль в инфекционных обострениях. По мере прогрессирования заболевания МВ легкое колонизируется бактериями, грибами и вирусами (Davies, Alton and Bush, 2007). Таким образом, в центре внимания терапии заболевания становится уничтожение болезнетворной микрофлоры, чего можно достичь с помощью ингаляционных антибиотиков, таких как тобрамицин, а также системной поддерживающей терапии. Однако пациентам также требуются традиционные методы лечения обструктивных заболеваний легких, такие как кортикостероиды и бронхолитики для улучшения функции легких. Возможно, одним из самых захватывающих событий является начало клинических испытаний долгожданной генной терапии. Британский консорциум генной терапии CF разработал распыленный препарат, содержащий невирусный генный вектор, который доставляет функционирующий ген CFTR (Griesenbach and Alton, 2009). Хотя нынешний подход имеет определенные ограничения, были идентифицированы суррогатные маркеры, и несколько пациентов продемонстрировали восстановление функции CFTR (Davies *et al.*, 2011).

10.2.4 Инфекция дыхательных путей

Респираторные инфекции, как правило, протекают относительно самостоятельно и поддаются лечению короткими курсами перорально вводимых антибиотиков. Однако нескольким группам пациентов, испытывающих длительную колонизацию легких (например, МВ) или оппортунистические инфекции (например, пациентам с ослабленным иммунитетом), было бы полезно местное введение антибиотиков, которые плохо переносятся или недоступны при системном введении. Часто бывает трудно достичь достаточных локальных концентраций препарата для лечения туберкулезных инфекций, и локализованная доставка может предложить решение, обеспечивающее достижение относительно высоких местных концентраций (Smaldone, 2006). Доступные методы ингаляционной антибактериальной терапии включают распыленные тобрамицин и колистин, которые получили широкое применение при лечении МВ (Флум *et al.*, 2007). Также существует большой интерес к доставке антибиотиков в виде аэрозолей для профилактики и лечения пневмонии, связанной с искусственной вентиляцией легких, опять же с использованием тобрамицина, колистина, цефтазидима и амикацина (Dhand and Sohal, 2008; Lu *et al.*, 2011). Возобновление интереса к поставкам антибиотических средств для лечения легочных инфекций привело к добавлению в продаваемый формуляр раствора азтреонама в виде небулайзера и тобрамицина в виде сухого порошка для ингаляций (Geller, Weers and Heuerding, 2011). тобрамицин в форме сухого порошка для ингаляций.

10.2.5 За пределы легких: системная доставка лекарств

Большая площадь поверхности, тонкий эпителиальный барьер и отсутствие мукоцилиарного клиренса делают терминальные бронхиолы и альвеолярные области легких привлекательной мишенью для всасывания препарата. Водорастворимые аэрозоли быстро растворяются в жидкости, выстилающей легкие, и

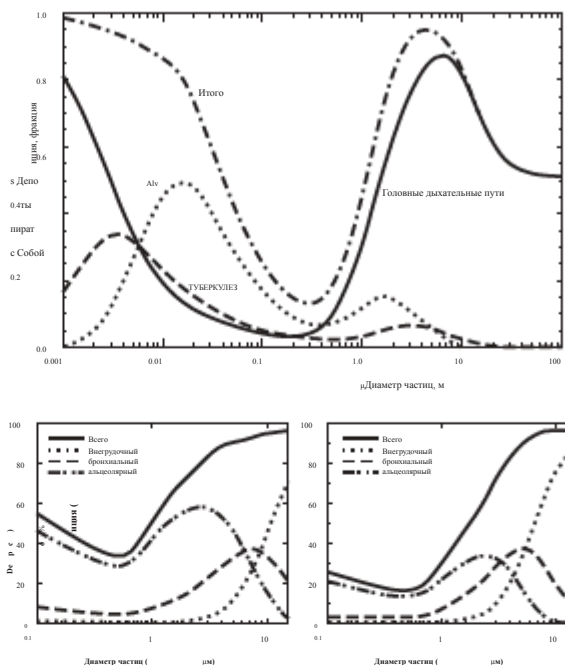
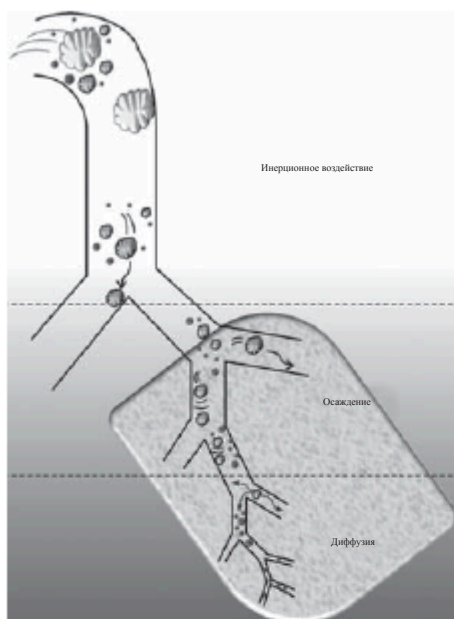
последующее интенсивное всасывание приводит к более быстрому наступлению эффекта, чем это обеспечивается традиционными пероральными лекарственными формами. Системная доставка лекарств - явление не новое, о чем свидетельствует человеческая изобретательность, проявленная при определении диапазона химических веществ и паров, которые приятно курить или вдыхать. Два самых ранних дозированных ингалятора под давлением (pMDI) были предназначены для системного действия - Riker (3M) Medihaler Nitro™ и Medihaler- Эрготамин™. В 1990-х и 2000-х годах произошел взрыв интереса к исследованиям и разработкам, которые использовали потенциал легких как портала для системного всасывания лекарственных средств.

Системная доставка через ингаляции часто рассматривается отдельно от заболеваний легких, и влияние заболеваний легких на эффективное нацеливание менее изучено из-за исключения таких пациентов из многих исследований. Однако даже в здоровых легких задача воспроизводимой доставки аэрозолей в альвеолярную область не является тривиальной. Для оптимизации системной доставки лекарств был разработан ряд биоинженерных подходов с целью контроля физико-химических свойств аэрозолей в отношении размера, плотности, морфологии и твердого состояния и, таким образом, достижения глубокого осаждения в легких (Edwards and Dunbar, 2002; Чау - Чау *et al.*, 2007). Также были проведены значительные исследования устройств доставки, которые сводят к минимуму вариабельность дыхательных паттернов и, таким образом, обеспечивают воспроизводимую, контролируруемую доставку лекарств (Scheuch *et al.*, 2006). Легочный путь обеспечивает существенное повышение системной биодоступности макромолекул, таких как белки и пептиды, по сравнению с другими неинвазивными путями доставки (Patton, Fishburn and Weers, 2004). Действительно, клинический потенциал ингаляционного инсулина был выявлен многими компаниями, вышедшими на рынок под названием Exubera®

(Нектар / Pfizer) (Мастрандреа и Кваттрин, 2006). С момента выхода из Exubera®, произошло некоторое перераспределение акцента на доставку лекарств в легкие в сторону применения полученных знаний для улучшения локализованной терапии заболеваний дыхательных путей. Однако несколько компаний поддерживают систему доставки лекарств, включая средства для улучшения обезболивания, лечения эректильной дисфункции, мигрени и паркинсонизма, во всех случаях требуется быстрое начало действия.

10.3 Важные физико-химические свойства аэрозоля при отложении в легких

Задача доставки лекарств в легкие заключается в достижении высокого осаждения в легких вдыхаемых аэрозолей в целевой области либо для местного фармакологического ответа, либо для системного всасывания. Из-за дихотомического разветвления дыхательных путей легкое разделено на поколения дыхательных путей с уменьшающимся калибром, но количество которых увеличивается. Происходит изменение направления воздушного потока, и скорость воздушного потока уменьшается с ламинарного до застойного в бронхиально-альвеолярной области (Martonen, 1993). Таким образом, вдыхаемый аэрозоль подвергается различным нагрузкам, которые препятствуют проникновению аэрозоля в глубокие слои легких, и частицы аэрозоля в основном откладываются в дыхательных путях в результате процессов инерционного удара, осаждения, диффузии, перехвата и электростатического притяжения (рис. 10.2). Различные анатомические, физиологические и физико-химические свойства определяют профиль осаждения вдыхаемых аэрозолей (таблица 10.1). Можно контролировать физико-химические свойства вдыхаемого аэрозоля, чтобы контролировать механизмы осаждения частиц. Основными свойствами для контроля являются размер частиц, плотность, форма, заряд, твердое состояние и гигроскопичность. Полезно рассмотреть, как физико-химические свойства аэрозолей определяют отложение в легких.



Преобладающие механизмы отложения в различных областях легких и индекс массы тела- **Рисунок**

10.2 катион регионального осаждения в зависимости от размера частиц (вверху справа). Место осаждения более мелких частиц в мелких дыхательных путях уменьшается со сдвигом профиля осаждения в сторону более крупных дыхательных путей при увеличении скорости вдыхаемого воздуха (внизу справа). Вверху справа: перепечатано с Карвалью, Питерс и Уильямс (2011). Авторское право © 2011, с разрешения Elsevier. Бот- том справа: Перепечатано с Scheuch et al. (2006). Авторское право © 2006, с разрешения Elsevier.

Физико-химические и физиологические факторы содержат- **Таблица**

10.1 легочные отложения при добыче полезных ископаемых.

Переменная классификации свойств, влияющая на отложения, влияющая на свойства частиц, Плотность

	Диаметр,
	Форму,
	Растворимость / гигроскопичность
	заряд,
Свойства аэрозоля	концентрацию
	Диапазон размеров частиц
	Болносное или
Анатомические свойства	непрерывное облако
	Скорость геометрии
	аэрозоляЗаболевание
	Влажность При
Физиологические свойства	вдыхании Времяпробывляюща
	При дыхании
	через рот /нос

Различные математические и анатомические модели легких (Weibel, 1963; Martonen, 1993; Martonen and Katz, 1993) в настоящее время подтверждены экспериментальными данными, касающимися влияния свойств частиц на место и степень отложения в легких дыхательных путях (Притчард, 2001; Ростами, 2009; Карвалью, Питерс и Уильямс, 2011). Аксиома, созданная в результате исследований аэрозольного осаждения, состоит в том, что частицы должны обладать аэродинамической-номинальный диаметр (d_{a0}) 10 мкм, чтобы повысить вероятность их прохождения через ротоглотку (Хейдер, 2004). В частности, а d_{a0} для местной аэрозольной терапии требуется 2-6 мкм, в то время как размер 1-3 мкм предпочтителен для нацеливания на периферические (меньшие) дыхательные пути. Отложение аэрозоля в легких также зависит от характера вентиляции, с помощью которой аэрозоль вдыхается, хотя это трудно контролировать у пациентов и между ними. Поэтому целью науки о рецептурах и химической инженерии является получение аэрозолей с физико-химическими свойствами, необходимыми для оптимизации места и степени осаждения аэрозоля в легких. Аэродинамический диаметр, сфера плотности, которая обладает той же скоростью оседания, что и рассматриваемая частица, и может быть выражена как:

$$d_{a0} = d_g \sqrt{\frac{\rho}{\chi}}$$

ρ

χ это динамика, в которой d_g - геометрический

и коэффициент коррекции формы. Ранее было высказано предположение, что гигроскопичность и растворимость в воде являются критическими физико-химическими свойствами из-за возможности изменения плотности частиц, геометрического диаметра или формы в результате сорбции воды (Хиллер, 1991; Феррон, 1994). Однако влияние гигроскопичности, несмотря на допущения при моделировании, далеко не изучено в контексте аэрозолей на основе сухого порошка и пропеллента.

Частицы крупного аэродинамического размера частиц вдыхаемого и на высокой скорости депозит по инерционному уплотнению в дыхательные пути бифуркаций. Частицы, которые достаточно малы, чтобы избежать удара, подвержены отложению в результате осаждения (которое преобладает в периферических дыхательных путях) и диффузии. Эти последние механизмы усиливаются периодами задержки дыхания. Существует определенная степень перекрытия между частицами, которые осаждаются при ударе и осаждении (1-10 мкм), осаждении и диффузии (0,1 - 1,0 мкм) и частицами, которые осаждаются исключительно путем диффузии (<0,1 мкм) (Хейдер, 2004; Мицаку, Хелмис и Хусинадас, 2005). Роль заряда аэрозоля в осаждении представляет определенный интерес из-за четких свидетельств электростатического заряда аэрозолей во время генерации с помощью портативных устройств (Квок и Чан, 2009). Влияние на осаждение было убедительно продемонстрировано (Бейли, 1997; Бэйли, гашиш и Вильямс, 1998). Однако роль электростатического заряда в отложении в легких была поставлена под сомнение (Jeffers, 2007), поскольку аэрозольные частицы должны располагаться близко к стенке дыхательных путей, чтобы притяжение заряда имело какой-либо эффект (Jeffers, 2005).

10.4 Судьба вдыхаемых аэрозольных частиц в легких

Судьба вдыхаемых частиц определяется несколькими факторами, включая физико-химические характеристики, место осаждения в дыхательных путях и биологическую защиту, такую как мукоцилиарный транспорт и резидентные макрофаги дыхательных путей. Хотя в определенных ситуациях частицы поглощаются неповрежденными клетками дыхательных путей, в основном высвобождаются молекулы

из осажденных частиц путем растворения или разделения извлекаются биологически активные вещества. Молекулярный вес, гидрофобность, pH, заряд, химическая структура и молекулярное расположение - все это влияет на растворимость и поглощение воздействия через эпителий дыхательных путей. Молекулы могут проникать через эпителий дыхательных путей двумя основными путями: либо проходя между соседними клетками (параклеточный транспорт), либо проходя через фосфолипидный бислой (трансклеточный транспорт). Трансклеточный транспорт может происходить путем простого разделения и пассивного слияния или с помощью более сложных активных механизмов, включая эндоцитоз и опосредованный переносчиками транспорт. На самом деле вдыхаемые вещества могут проникать в эпителий дыхательных путей по множеству путей, определяемых их физико-химическими характеристиками.

10.4.1 Параклеточный транспорт

Поляризованные эпителиальные клетки дыхательных путей имеют высокоспециализированные соединительные комплексы между соседними клетками, которые действуют как избирательно проницаемый барьер, отделяющий внешнюю среду от внутренней среды легкого. В эпителиальных клетках дыхательных путей три специализации межклеточных мембран составляют соединительный комплекс, а именно плотные соединения, адгезивные соединения и десмосомы (Denker and Nigam, 1998). Плотные соединения содержат более 40 различных белков и образуют непрерывный межклеточный барьер между соседними эпителиальными клетками. Они регулируют избирательное перемещение растворенных веществ через эпителий и обеспечивают основной барьер для проникновения веществ параклеточным путем (Mitic, van Itallie and Anderson, 2000). Скорость параклеточного транспорта регулируется Законом Фика, определяемым градиентом концентрации и обратно пропорциональным молекулярной массе. Небольшие гидрофильные молекулы, такие как маннит, способны пассивно диффундировать через соединительные комплексы между соседними клетками (Anderson and Vanitallie, 1995). Проницаемость для растворенных веществ через плотные соединения различна между различными эпителиями, но было установлено, что макромолекулы размером менее 40 кДа могут пассивно всасываться через эпителий дыхательных путей через плотные соединения (Patton, 1996; Li). (рис. 1). Проницаемость для растворенных веществ через плотные соединения различна между различными эпителиями, но было установлено, что макромолекулы размером менее 40 кДа могут пассивно всасываться через эпителий дыхательных путей через плотные соединения. *et al.*, 2006). Крупные макромолекулы (>40 кДа) и более гидрофобные вещества не могут проникать через клетки парацеллюлярно и могут только проникать через биологические мембраны трансцеллюлярными путями.

10.4.2 Межклеточный транспорт

Молекулы ингаляционного лекарственного средства имеют различные физические барьеры для всасывания лекарственного средства в дыхательных путях, в зависимости от мест их осаждения и действия. В бронхиальном эпителии для трансцеллюлярного поглощения молекул лекарственного средства из воздушного пространства требуется диффузия через апикальный слой слизи и проникновение в липидную клеточную мембрану. Слизистая оболочка проводящих дыхательных путей состоит из нескольких клеточных слоев, по которым любой лекарственный компонент должен перемещаться, прежде чем он сможет пройти в кровоток через капилляры в собственной пластинке. С другой стороны, далее вниз по Respiratory тракта в сторону терминальных бронхиол, продукцию слизи прекращается и заменяется легочным сурфактантом. Кроме того, альвеолы тесно связаны с крупной капиллярной сетью, и в этой части легких вдыхаемым молекулам требуется только проникнуть через тонкий альвеолярный эпителий и эндотелий капилляров, прежде чем они будут поглощены кровотоком.

Благодаря липофильной природе фосфолипидного бислоя низкомолекулярные липофильные молекулы лекарственных средств могут транспортироваться трансцеллюлярно путем простой пассивной диффузии, поскольку они способны проникать через клеточный липидный бислой. Растворимость соединения в липидах равна определяется его коэффициентом распределения в масле / воде ($\log P$); следовательно, если $\log P$ равен

>0 , то

соединение является жирорастворимым, и для низкомолекулярных соединений процентное содержание абсорбированного увеличивается с увеличением значения $\log P$. Однако, если значение $\log P$ слишком велико $>(6)$ молекулы могут нелегко отделяться от липидного бислоя, и это может привести к плохому абсорбция. Препараты с более высокой молекулярной массой ($Mw > 500-700$), и, в частности, заряженные молекулы, также, как было показано, обладают ограниченным перемещением через клеточные мембраны посредством пассивной диффузии (Camenisch *et al.*, 1998). Ионизация снижает липофильность соединения и ограничивает разделение в липидном бислое, снижая скорость пассивной трансклеточной диффузии. Другие межклеточные пути, по которым более крупные ионизированные молекулы могут транспортироваться через эпителий, будут рассмотрены позже.

10.4.3 Транспорт, опосредованный перевозчиком

В фосфолипидный бислой встроены несколько различных классов специализированных мембранных белков, которые способны связывать субстраты и транспортировать их через клеточную мембрану в как абсорбционном, так и секреторном направлениях (рис. 10.3). Эти транспортные системы могут транспортировать вещества либо путем облегченной диффузии (с градиентом концентрации), либо путем активного переноса (против градиента концентрации). В легочном эпителии транспортеры расположены на апикальной мембране (ближайшей к просвету дыхательных путей) и на базолатеральных поверхностях. Существует два основных типа переносчиков: эффлюксные транспортеры, которые выталкивают молекулы из мембраны или внутреннего листка и выводят их из клетки, и транспортеры поглощения, которые транспортируют молекулы через плазматическую мембрану в клетку. Многие транспортеры обладают способностью транспортировать широкий спектр структурно и химически сходных субстратов, включая терапевтические компоненты лекарственных средств (Zhou *et al.*, 2008). Имеются также доказательства экспрессии и активности переносчиков катионов в эпителии дыхательных путей, которые способны переносить заряженные молекулы, включая ингаляционные препараты, такие как сальбутамол и ипратропий (Bosquillon, 2010).

Молекулы большего размера (~ 500 Да) могут поглощаться эндоцитарными путями, в которых часть плазматической мембраны интернализуется и отщипывается с образованием внутриклеточного пузырька, содержащего часть внеклеточной среды и способного включать твердые частицы. В некоторых случаях эти пузырьки (эндосомы) сливаются с лизосомами, разрушая содержимое

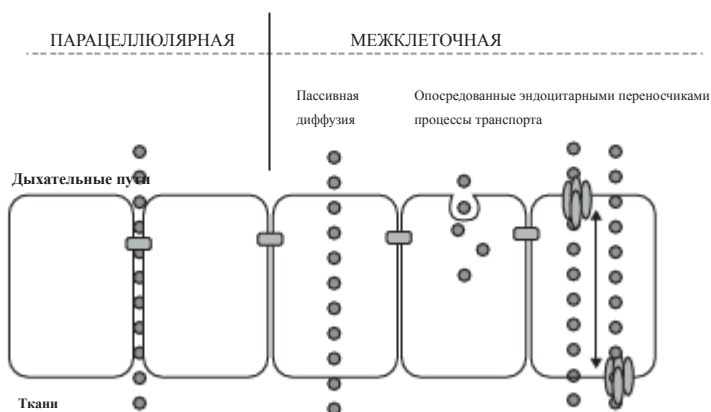


Рисунок 10.3

Пути проникновения веществ через эпителий дыхательных путей.

через ферменты в лизосомах и высвобождая их в клетки. Однако может также происходить транцитоз, при котором эндосома мигрирует по клетке и сливается с базолатеральной мембраной, высвобождая свое содержимое во внеклеточную среду.

10.4.4 Модели для определения судьбы вдыхаемых аэрозолей

Существует несколько различных типов биологических моделей, доступных для изучения безопасности и эффективности вдыхаемых соединений. Помимо моделирования абсорбции и/или способности к проникновению веществ через эпителий дыхательных путей, эти модели также могут быть использованы для изучения метаболизма и токсикологических и воспалительных реакций дыхательных путей на вдыхаемые вещества и для моделирования респираторных заболеваний.

10.4.4.1 *In Vivo* Модели

Из имеющихся моделей животных наиболее часто используется крыса из-за ее размера, который достаточно мал для достижения экономичного дозирования, но достаточно велик для манипуляций при многократном введении и заборе крови. Существует несколько методик, но, как правило, животное сначала подвергается анестезии, а затем подвергается трахеотомии или оротрахеальной интубации. Субъекта удерживают в положении лежа на спине, пока либо закапывают раствор лекарственного средства, либо вводят аэрозольный состав через трахею. Пока *in vivo* исследования предоставляют фармакокинетические данные относительно судьбы лекарственного средства и его метаболитов в организме целого животного, существует высокая степень межлабораторной вариабельности, в первую очередь вызванная различиями в методологии и региональном распределении в легких. Кроме того, необходимо учитывать этичность тестирования на животных и стоимость экспериментов *in vivo*. Были продемонстрированы значительные различия в распределении вдыхаемых частиц в легких животных, что подчеркивает необходимость подтверждения фармакокинетических параметров с использованием *ex vivo* и методы *in vitro* (Сакагами, 2006).

10.4.4.2 *Ex Vivo* Модели

Ex vivo модели на животных включают свежевыделенную целую или частичную легочную ткань (в первую очередь крысу, морскую свинку или кролика) и обычно используются в биофармацевтических исследованиях, когда механизм транспортировки лекарственного средства не полностью выяснен *in vitro* и *in vivo* Модели. Тонкие срезы легочной ткани были использованы для оценки метаболизма, фармакологии и токсикологии лекарственных средств (Ressmeyer *et al.*, 2006), в то время как тканевые полоски использовались в ванночках для тканей и камерах для промывания для оценки проницаемости лекарственного средства (Widdicombe, 1997). Одним из основных ограничений препаратов из срезов ткани легкого является то, что из-за размера ткани они доступны только для крупных дыхательных путей. Модели изолированного перфузированного легкого (IPL) являются полезным инструментом, позволяющим исследовать фармакокинетику легких без учета системных эффектов *in vivo* Модели. В моделях IPL легкие животных (обычно крыс) изолируются от общего кровотока и перфузируются через малый круг кровообращения. Преимущество этой экспериментальной установки в сохранении архитектуры тканей (структура, проницаемость) и функциональности (взаимодействие клеток, биохимическая активность), являясь более точным представлением *in vivo* состояние, чем есть моделирование *in vitro*. Кроме того, вентиляцию и перфузию можно жестко контролировать, а забор перфузата легко доступен. Однако ткань остается жизнеспособной только в течение 3-5 часов после выделения, и это ограничение по времени делает невозможным исследование более медленных фармакокинетических процессов. Кроме того, в то время как легочное кровообращение находится

при сохранении данных бронхиальное кровообращение, вероятно, будет нарушено во время процесса тканевой изоляции. Следовательно, абсорбция в трахео-бронхиальной области вряд ли будет представлена в этой модели (Мехендейл, Анжевин и Омия, 1981; Сакагами, 2006).

10.4.4.3 In Vitro Модели

Респираторный эпителий *in vitro* модели включают гомогенные или гетерогенные популяции эпителиальных клеток либо из первичного источника (выделенных непосредственно из легких человека и других животных), либо из immortalized клеточных линий (полученных из раковых источников или трансформированных с помощью вирусов). Клетки обычно культивируются на подвешенных вставках, что позволяет дифференцировать клетки на границе раздела воздух - жидкость. Несколько доступных моделей клеток образуют функциональные плотные соединения в культуре, создание поляризованных клеточных слоев, разделяющих апикальную и базолатеральную поверхности эпителия, и предоставление возможности изучить способность веществ проникать через клетки. Однако клеточные линии, которые не образуют поляризованных слоев эпителия дыхательных путей, по-прежнему используются для изучения метаболизма, клеточного ответа и других фармакологических аспектов с использованием высокопроизводительного исследовательского подхода (Sporty, Horalkova and Ehrhardt, 2008).

Установлено *in vitro* культуры клеток, используемые для моделирования как бронхиальной, так и альвеолярной эпителиальных областей, а также моделей заболеваний, обобщены в таблице 10.2. Хотя первичные клетки обеспечивают наиболее близкие нативные культуры эпителия дыхательных путей *in vitro*, их

in vitro

модели эпителия дыхательных путей (информация адаптирована из Sporty, Horalkova и Ehrhardt, 2008). Краткое

Таблица 10.2
изложение биологических характеристик, обычно используемых человеком Тип модели Исходный Фенотип Поляризованный

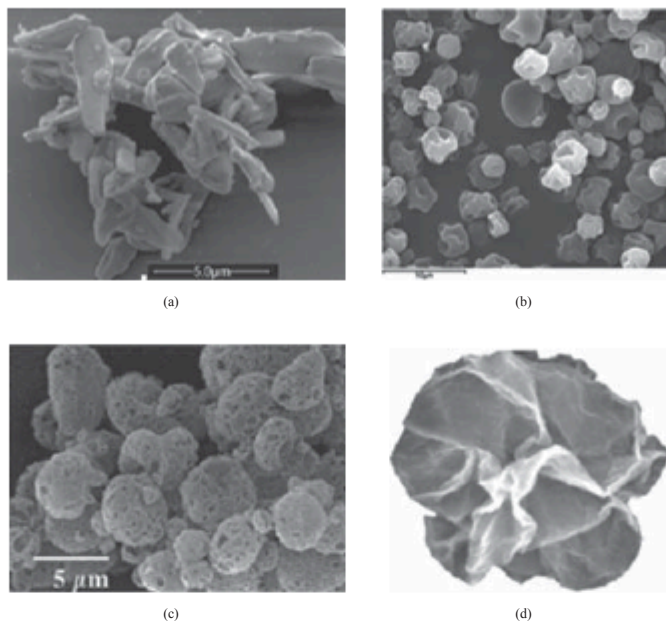
Культура				
на границе раздела воздух-жидкость				
Бронхиальные				
Первичные клетки	Здоровые ткани	Смешанная популяция дыхательных путей	Да	
		продуцирующий слизь		
Calu-3	Аденокарцинома	С редкими реснитками, продуцирующий слизь	Да	Да
16HBE14o-	Трансформированный здоровая ткань	Без ресничек, несекреторный	Да	Нет
BEAS-2B	Трансформирована здоровая ткань	Без ресничек, несекреторная	Нет	Нет
NuLi-1	Трансформирована здоровые ткани	С редкими реснитками, продуцирующие слизь	Да	Да
Альвеолярные				
Первичные клетки	Здоровая ткань	Смешанная популяция дыхательных путей	Да	Да
A549	Аденокарцинома	Альвеолярные клетки II типа, подобные морфология	Нет	Да
H441	Аденокарцинома	Альвеолярный тип II клеточного типа и бронхиолароподобный	Возможно	Да
Муковисцидоз				
CFBE41o-	Трансформированный здоровая ткань	Без ресничек, несекреторный	Да	Нет
CuFi-3	Трансформирована здоровые ткани	С редкими реснитками, образование слизи	Да	Да

ограниченный функциональный срок службы (два-три пассажа), изменчивость доноров и высокая стоимость культивирования являются основными ограничениями (Forbes and Ehrhardt, 2005), которые делают их менее экономичными и удобными, чем другие *in vitro* Модели. Учитывая значительно более низкие затраты на культивирование, уменьшенную вариабельность и более длительный функциональный период пассажа, иммортализованные клеточные линии часто являются *моделями выбора in vitro*. Принимая во внимание, что для других эпителиев существует единый "золотой стандарт" *in vitro* создана клеточная линия для моделирования проницаемости, для эпителия дыхательных путей соглашение не было достигнуто.

Разработка *in silico* модели для прогнозирования адсорбции, распределения, метаболизма и выведения пероральных лекарственных препаратов-кандидатов (например, GastroPlus™) стимулировали интерес к разработке аналогичных моделей для прогнозирования фармакокинетики при вдыхании. Существующие *модели in silico* наиболее известны для моделирования и прогнозирования отложения вдыхаемых частиц лекарственного средства в легких. Исследования показали, что физико-химическими свойствами молекул лекарственного средства, которые наиболее влияют на всасывание в легких, являются липофильность, молекулярная площадь полярной поверхности и потенциал водородных связей. *In vitro -in vivo* также были установлены корреляции между *in vivo* всасыванием ингаляционных лекарственных средств крысой и человеком *in vitro* проницаемость клеточной культуры (Матиас *et al*, 2002; Тронде *et al*, 2003; Манфорд *et al*, 2005), позволяющий математически предсказывать абсорбцию лекарств при вдыхании. Недавно было разработано предсказание эффективных доз в легкие *in vivo* также были возможны количественные модели взаимосвязи структуры и деятельности (Купер, Поттер и Люкер, 2010). Создание таких моделей улучшит понимание ингаляционных биофармацевтических препаратов и потенциально может свести к минимуму использование обширных методов *тестирования in vivo* в будущем.

10.5 Образование частиц, пригодных для вдыхания

Воздействие окружающих и атмосферных аэрозолей обычно происходит в виде предварительно рассеянных аэрозольных облаков. Это невозможно для фармацевтических составов, в которых аэрозоль должен формироваться по требованию с воспроизводимыми физико-химическими свойствами, чтобы пациент мог вдыхать его по мере необходимости. Тремя основными платформами являются методы получения капель из сыпучих растворов или суспензии (например, распыление), методы выделения облаков частиц в виде сухого порошка (например, ингаляторы с сухим порошком, DPI) и методы выделения конденсированных паров (например, сигареты). За исключением небулайзеров на основе растворов, пропеллентных ДИ на основе растворов и систем разработки (например, генератор капиллярного аэрозоля; Longest, McLeskey and Hindle, 2010), большинство лекарственных средств для перорального вдыхания содержат аэрозолируемое лекарственное средство в форме частиц. Преимущества твердого состояния заключаются в возможности повышения химической стабильности по сравнению с составами растворов и в возможности контроля свойств частиц, определяющих отложение в легких. Поэтому необходимо производить частицы в диапазоне малых микронных размеров, которые могут быть использованы в продуктах для доставки лекарств. Существует два класса методов получения частиц - деструктивные и конструктивные методы - которые используются для приготовления ингаляционных препаратов. **10.5.1 Истирание и измельчение частиц** Производство частиц, пригодных для вдыхания, включает периодическую кристаллизацию активного фармацевтического ингредиента, выделение и сушку, причем все это выполняется с уделением особого внимания контролю свойств твердого состояния и частиц. Впоследствии,



(a) Частицы для вдыхания, полученные микронизацией. Исходное изображение выполнено Рис. 10.4 Д. Мурнайн. (b) Полимерные микросферы, полученные обычной распылительной сушкой. Изображение от Ли и Севильи (2010). (c) Мелкие пористые частицы PulmoSphere™, полученные распылительной сушкой с перфторалкановым вспенивающим веществом. Изображение от Duddu et al. (2002). (d) Alkermes AIR™ крупные пористые частицы, которые могут быть получены путем эмульгирования-выпаривания или контролируемой распылительной сушки. Изображение из Edwards (2002).

фрезерование выполняется с помощью ряда процессов, которые зависят от свойств исходного материала и желаемых свойств продукта. Струйное измельчение (также известное как микронизация) - это процесс измельчения на истирание, который позволяет получать материалы в диапазоне размеров 1-10 мкм и традиционно использовался для уменьшения размера кристаллических материалов для вдыхания (рис. 10.4). Струйное измельчение - относительно старый метод, который был изобретен в девятнадцатом веке, но широко использовался для ингаляционной доставки лекарств с момента разработки первых суспензионных PMDI лабораториями Riker в 1960-х годах.

Частицы вводятся в камеру измельчения с использованием энергии жидкости газа-носителя. Поток частиц встречается с противоположной струей жидкости, что приводит к соударению частиц с высокой интенсивностью. Газ-носитель может быть инертным (например, азот), и весь процесс может выполняться при низкой температуре, чтобы обеспечить измельчение термолабильного материала. Уменьшение размера частиц происходит в результате измельчения и разрушения при ударе подаваемого материала в камере измельчения (Midoux *et al.*, 1999).

Популярность струйного измельчения объясняется его относительной простотой и установленным масштабированием, которое зависит от размера емкости для сбора и бункера для продукта. Этот процесс поддается моделированию (Teng *et al.*, 2009) (и уменьшение размера частиц может быть оптимизировано путем изменения скорости подачи, давления газа-носителя и геометрии мельницы (Zhao and Schurr, 2002; Teng *et al.*, 2009)). Микронизация - это метод классификации частиц по размерам, который означает, что частицы подвергаются множеству соударений, прежде чем достигают соответствующего размера и выходят из камеры измельчения. Классификация обычно достигается за счет использования сит для защиты камеры измельчения или использования циклонных сепараторов, которые, в зависимости от конструкции, обеспечивают сбор частиц, пригодных для вдыхания.

Микронизация не является универсальным решением для уменьшения размера частиц. Белки и пептиды, как правило, не поддаются измельчению, но было показано, что применение гранулирования в виде жидкой суспензии при низких температурах является приемлемым (Иргартингер *et al.*, 2004). Подаваемый материал для микронизирования требует хороших свойств текучести, а частицы должны обладать низкой прочностью на растяжение и эластичностью. Даже для материалов, пригодных для струйного измельчения, эффективность процесса низкая, поскольку для достижения требуемого выхода материала требуется несколько проходов. Хотя образуются частицы в диапазоне размеров, пригодных для дыхания, они демонстрируют полидисперсность распределения частиц по размерам (Midoux *et al.*, 1999), нежелательное свойство для терапии (Занен, Го и Ламмерс, 1998). Разрушающие методы также обеспечивают плохой контроль формы частиц (Akbarieh and Tawashi, 1987) и пористости, которые оказывают существенное влияние на аэродинамические диаметры.

Микронизация подвергает кристаллы лекарственного средства воздействию высокоэнергетических воздействий, приводящих к частичному разрушению, обычно в области наименьшей энергии прикрепления (York *et al.*, 1998). Механические и трибомеханические воздействия при измельчении часто вызывают твердофазные превращения в кристаллических частицах лекарственных средств, и вновь образовавшиеся фазы могут стать метастабильными после устранения этих сил. Эти твердотельные преобразования могут быть такими же серьезными, как полиморфный переход (Bauer-Brandl, 1996; Chieng *et al.*, 2006; Чихалия *et al.*, 2006). обширная объемная аморфизация (Паттерсон *et al.*, 2005; Гейсфорд *et al.*, 2010). Полная аморфизация частиц, однако, является редким явлением при струйном измельчении. Поверхностное воздействие более распространено в форме аморфизации поверхностных участков (эламин *et al.*, 1994; Brodka-Pfeiffer *et al.*, 2003). Более типичным является создание кратковременного беспорядка, такого как кристаллическая решетка нарушение или дислокации (Перкинс *et al.*, 2009). Основная трудность при микронизации заключается в непредсказуемости событий разрушения и неравномерном приложении усилий. Таким образом, в дополнение к распределению частиц по размерам частицы также будут иметь распределение по поверхностной энергии (Тон *et al.*, 2005). Любое изменение химического состава поверхности или энергии в результате фрезерования может диктовать эффективность рецептуры. Например, физико-химическая нестабильность и неоднородность поверхности (Берард *et al.*, 2002) приведет к изменению характеристик порошка с течением времени (Джоши, Дживеди и Уорд, 2002). Конечным продуктом микронизации является частица, обладающая электростатическим зарядом, высокой поверхностной энергией и физической и химической нестабильностью, которая обладает высокой когезионной способностью и препятствует аэродинамическому рассеиванию с образованием аэрозоля, пригодного для вдыхания (Фукунака *et al.*, 2005).

10.5.2 Производство конструктивных частиц

Конструктивные методы получения частиц предоставляют возможность изменять свойства частиц микронного размера, которые улучшают механизмы осаждения и повышают эффективность аэрозолизации. Из-за ограничений микронизации в отношении контроля и оптимизации свойств частиц и ее особенно низкой способности применяться при производстве биофармацевтических препаратов, для ингаляционных формул был применен ряд конструктивных методов. До сих пор эти методы не оказали большого влияния на рынок, и на рынок было выпущено только два продукта, в которых используется распылительная сушка. Альтернативные методы производства могут быть широко классифицированы как процессы "от капли к частице" (например, распылительная сушка) или процессы кристаллизации в растворе (рис. 10.4). Методы преобразования капель в частицы включают распылительную сушку, сублимационную сушку распылением и процессы сверхкритической распылительной сушки, все из которых были широко исследованы и применимы для биофармацевтических препаратов и низкомолекулярных соединений (Chow *et al.*, 2007).

Типичным процессом распылительной сушки является приготовление раствора исходного лекарственного средства (который может представлять собой неводный растворитель), формирование струи с использованием воздушно-струйного распылителя и поверхностного контакта с осушающим воздухом, испарение растворителя при повышенных температурах и, наконец, отделение высушенного продукта (обычно с использованием циклонного коллектора). При распылительной сублимационной сушке распыленный на атомы раствор собирается в криогенной жидкости (например, жидком азоте) и затем лиофилизирован (Yu, Johnston and Williams, 2006). Высушенный порошок, полученный в результате распылительной сушки и распылительной сублимационной сушки, может быть получен в виде относительно сыпучих порошков с размером частиц

диапазон < 5 мкм, но это сопряжено с трудностями при оптимизации процесса и выходе

(Эдвардс и Данбар, 2002). Методы "Раствор-капля" и "суспензия-капля", включая распылительную

сушку наночастиц для создания композитов микронного размера (Bhavna

, 2009), *et al*

может использоваться для контроля конечных свойств частиц путем регулирования скорости подачи, условий распыления и скорости сушки (например, использования сорастворителей). Также возможно включение вспомогательных веществ и сорастворителей для изменения свойств поверхности, плотности, площади поверхности и формы частиц, высушенных распылением. Примером может служить кратко продаваемая Exuberg[®] состав

инсулина: частицы низкой плотности, которые обеспечивают стабилизацию

белка с использованием маннита, глицина и цитратов (Беккер, 2003). Альтернативный подход предполагает включение *et al*

вспенивающий агент для придания порошку пористости, как это достигается с помощью технологии

PulmoSphere[™]. Эмульсия фторуглерода в воде, стабилизированная фосфолипидными

поверхностно-активными веществами (такие как PulmoСферы[™] для ингаляции тобрамицина

Powder[™], второй продукт на рынке, в котором используются методы распылительной сушки.

Подходы, основанные на преобразовании раствора в частицы, включают как традиционные технологии кристаллизации растворителем, так и процессы осаждения с использованием нетрадиционных растворителей, таких как сверхкритические жидкости (SCF) (Шекунов и Йорк, 2000), или привлекательный экологически безвредный подход с использованием полиэтиленгликоля (Murnane, Martin and Marriott, 2008a).

Осадки общий производственный процесс, заключающийся в быстрой кристаллизации препаратов, как правило, при высоких supersaturation, через изменение решения, условия, которые оказывает наркотиков неразрешима. Однако часто наблюдается разброс в скоростях кристаллизации, что затрудняет воспроизводимое образование частиц. Традиционные процессы кристаллизации с защитой от растворения включают тщательное перемешивание органических и водных растворителей и, как сообщалось, используются для получения микрокристаллов (Larhrib *et al.*, 2003b). Осадки обычно подвергаются дополнительным стадиям агломерации и старения, которые служат для расширения распределения частиц по размерам, что приводит к образованию кристаллов более крупного размера. Процессы агломерации и старения можно предотвратить за счет добавления полимерных добавок (например, поливинилпирролидона и полоксамера), которые нежелательны при вдыхании..... В качестве альтернативы, могут быть использованы методы контролируемого перемешивания (D'Addio and Prud'homme, 2011) или ультразвук во время кристаллизации (Ruecroft *et al.*, 2005).

SCF удобно позволяют изменять растворимость в зависимости от давления и температуры, что позволяет контролировать не только кристаллические формы, но и скорость десорбции. Поскольку большинство фармацевтических препаратов плохо растворимы в наиболее удобной и важной среде SCF (диоксид углерода) (Шекунов и Йорк, 2000), SCF можно использовать в качестве антирастворителя (так называемый метод "газового антирастворителя"), с органическим или aqueous раствором лекарственного средства, осажденного SCF. SCF проявляют диффузионную способность, на 2 порядка превышающую величину обычных растворителей (Reverchon, 1999), и демонстрируют низкое межфазное натяжение (Thiering, Dehghani and Foster, 2001). Таким образом, при смешивании быстрая диффузия в жидкие растворители приводит к контролируемому перенасыщению и кристаллизации, что приводит к малым размерам кристаллов и узкому распределению по размерам (Foster *et al.*, 2003).

Ряд фармацевтических препаратов был произведен в форме, пригодной для вдыхания ГАЗОВЫМИ методами, в том числе: сальметерола ксинафоат (Beach *et al.*, 1999), тербуталина сульфат (Rehman, 2004), ~~сальметерола~~ сальметерола сульфат (Schiavone *et al.*, 2004) и флунизолидом (Велага, Бергер и Карлфорс, 2002).

Конструктивные методы, такие как распылительная сушка и осаждение, имеют недостатки, в том числе приводящие к образованию аморфных частиц микронного размера (Чавла *et al.*, 1994) или метастабильных твердотельных форм (Реман *et al.*, 2004). Таким образом, альтернативные методы не всегда могут привести к получению ингаляционных лекарственных средств, обладающих улучшенными характеристиками твердофазности, и во многих случаях они не достаточно рентабельны для низкоценных активных фармацевтических ингредиентов, чтобы обеспечить замену микронизации в качестве стандартного метода получения аэрозольных частиц.

10.6 Системы генерации и доставки аэрозоля для легочной терапии

10.6.1 Распыленные методы лечения заболеваний

Небулайзеры являются одними из старейших применяемых в клинике систем генерирования аэрозолей и доставки лекарств, первая из которых была разработана в 1860-х годах компанией Siegle с использованием парового спрея под давлением (Sanders, 2007). Небулайзеры используют внешний источник энергии, такой как струя сжатого воздуха или ультразвуковые колебания, для создания капелек аэрозоля лекарственных растворов или суспензий, которые пациент вдыхает в виде облака. На долю небулайзеров приходится лишь около 12% всех продаж ингаляционных средств (Oversteegen, 2008), но они занимают важное место в неотложной помощи, где затруднено дыхание или где лечат младенцев и детей младшего возраста. Небулайзеры представляют собой относительно дорогостоящую систему доставки лекарств для лечения заболеваний дыхательных путей, таких как астма и ХОБЛ, а альтернативные портативные системы доставки предлагают улучшенные результаты при использовании бронхолитиков (Leversha *et al.*, 2000). Небулайзеры, как правило, назначают пациентам, у которых недостаточна функция легких или компетентность в использовании портативных устройств. Они обладают преимуществами в том, что аэрозоль доставляется в условиях нормального приливного дыхания, а распыление занимает важное место при таких заболеваниях, как МВ, благодаря своей способности доставлять высокие дозы антибиотиков и муколитиков. Несколько разработок привели к улучшению характеристик, таким как миниатюризация за счет использования небулайзеров с вибросетками и повышение эффективности дозирования за счет использования небулайзеров с открытым вентиляционным отверстием или небулайзеров, координирующих дыхание, которые выделяют аэрозоль во время фазы вдоха.

10.6.1.1 Рекомендации по составу аэрозоля

Распыляемые аэрозольные составы по определению имеют жидкую основу, и выбор состава в виде растворов и суспензий зависит от профиля растворимости и химической стабильности их активного фармацевтического ингредиента. В суспензионных составах наименьший потенциальный размер частиц распыленного аэрозольного облака определяется размером первичных микронизированных частиц лекарственного средства, и, следовательно, необходимо включать суспендирующие агенты, такие как поверхностно- активное вещество полисорбат 80, для предотвращения агрегации частиц в Пульмикорте будесониде и Фликсотиде флутиказона пропионате. Однако большинство лекарственных форм представляют собой водные растворы, в которых используется водорастворимая соль лекарственного средства для обеспечения высокой растворимости (например, сульфат сальбутамола) и предотвращения выпадения осадка при хранении. Соразтворители, такие как этанол и глицерин, могут быть использованы для солюбилизации плохо растворимых лекарственных соединений (например, ВентависTM илопрост трометамол). Водные составы доводятся до изотоничности с помощью

добавление хлорида натрия или систем, обеспечивающих буферизацию pH (например, цитрата натрия), чтобы избежать потенциальной бронхоконстрикции в ответ на гипотонические и гипертонические аэрозоли (Эшенбахер, Буши и Шенпард, 1984). Часто требуется рецептура белков и пептидов из-за высоких доз, необходимых для терапии, и это вызывает особые соображения по составлению рецептуры. Полипептиды подвержены денатурации под воздействием сдвига и адсорбции на границе раздела капля - жидкость (Patton, Fishburn and Weers, 2004), поэтому необходимо включать поверхностно-активные вещества. В случае рекомбинантной ДНКазы человека (Pulmozyme™) предотвращение дезамидирования требует поддержания pH до 6,3 и включения CaCl₂ для поддержания функции фермента (Gonda, 1996). Добавлены другие типичные вспомогательные вещества

к составам относятся противомикробные консерванты (например, бензалкония хлорид) и хелатирующие агенты (например, динатриевый эдетат). Компоненты рецептуры, которые входят в раствор/суспензию для подачи в распылитель, оказывают довольно значительное влияние на выход аэрозоля по массе и гранулометрическому составу, и необходимо учитывать их влияние на поверхностное натяжение, вязкость и скорость испарения жидкого диспергатора.

10.6.1.2 Образование капель При Аэрозолизации

Процесс образования капель и последующие свойства аэрозоля зависят от сочетания свойств исходного раствора/суспензии, а также от геометрии и механической энергии, прилагаемой для распыления (например, струи жидкости или ультразвуковой вибрации). Капли, образующиеся в процессе распыления, имеют сферическую форму, что делает их пригодными для исследования с помощью лазерных дифракционных методов (Юнг, 1996). Существует несколько основных методов определения туманностей (Юнг, 1996), которые были адаптированы в нескольких конфигурациях: воздушно-струйные распылители, которые работают по принципу Бернулли и требуют подачи сжатого воздуха, и ультразвуковые распылители, которые подают механическую энергию, создаваемую колебаниями пьезоэлектрического кристалла или вибрацией мембраны.

При струйном распылении сжатый воздух пропускается через небольшое отверстие, захватывает формирующую жидкость из одного или нескольких соседних капилляров. Система отверстий и капилляров отличается в зависимости от конструкции распылителя, но во всех случаях подаваемая жидкость диспергируется на капли в воздушном потоке путем первичного сдвига и вторичного разрушения капель (Le Brun *et al.*, 2000). Гидродинамический механизм разрушения означает, что струйное распыление подходит для образования аэрозолей в виде суспензий и растворов высокой концентрации (Hess, 2008). Поскольку капли, как правило, полидисперсные и большого размера, струйные распылители также содержат перегородки, которые обеспечивают инерционный барьер, эффективно ограничивающий выход мелких вдыхаемых капель. Крупные капли возвращаются в основную массу раствора или суспензии, тогда как более мелкие капли выходят с потоком воздуха при вдыхании, который может быть увеличен вторичным потоком воздуха через боковое вентиляционное отверстие. Пригодный для дыхания аэрозоль подвергается дополнительному кондиционированию во время вдыхания, которое может включать коалесценцию капель или испарение растворителя. Прохождение воздуха через камеру небулайзера вызывает испарение растворителя, которая концентрирует Дис- решена растворенного вещества в камере во время распыления цикла. Обычно при струйном распылении используются объемы 2-3 мл, для распыления которых может потребоваться 10-15 минут (Далби и Суман, 2003), но это время может быть сокращено при наличии вспомогательных воздушных потоков, которые уменьшают слипание капель и увеличивают массовый выход (Барри и О'Каллаган, 1999). Помимо конфигурации струи, факторами, влияющими на распределение капель по размерам, являются поверхностное натяжение жидкости, концентрация нелетучих растворенных веществ, вязкость жидкости

и скорость воздушного потока через устройство. Было замечено, что существуют значительные различия в выходе аэрозоля от устройств аналогичной конструкции, и хотя устройства сами по себе относительно дешевы, компрессоры, необходимые для подачи сжатого воздушного потока, сравнительно неподвижны и дороги.

Ультразвуковые распылители создают капли за счет приложения механической энергии к объему заполнения распылителя, создаваемому вибрацией пьезоэлектрического кристалла. Воздействие ультразвуковых колебаний на жидкость преодолевает ее поверхностное натяжение, что приводит к образованию капель из пиков капиллярных волн на поверхности объема. Во время применения ультразвуковой вибрации объем наполнителя имеет тенденцию к увеличению температуры, и хотя этому противодействует испарение растворителя, может потребоваться прервать распыление, если температура чрезмерно повысится. Ультразвуковые распылители распыляют жидкую фазу и как таковые менее подходят для распыления суспензий (Nikander, Turpeinen and Wollmer, 1999), которые, как правило, распыляются в виде крупногабаритных агломератов. Подобно струйным небулайзерам, ультразвуковые небулайзеры содержат перегородки для удержания крупных капель; однако образующийся аэрозоль улавливается самим пациентом на вдохе. Поскольку сжатый воздух не требуется, ультразвуковые распылители имеют меньшие размеры, более тихий и более приемлемый для пациентов.

Именно частота вибрации определяет образование капель в сочетании со свойствами жидкости для распыления. Частота, необходимая для создания капиллярных волн в жидкости, увеличивается по мере увеличения вязкости заливаемой жидкости; длина волны в капиллярах выражается как:

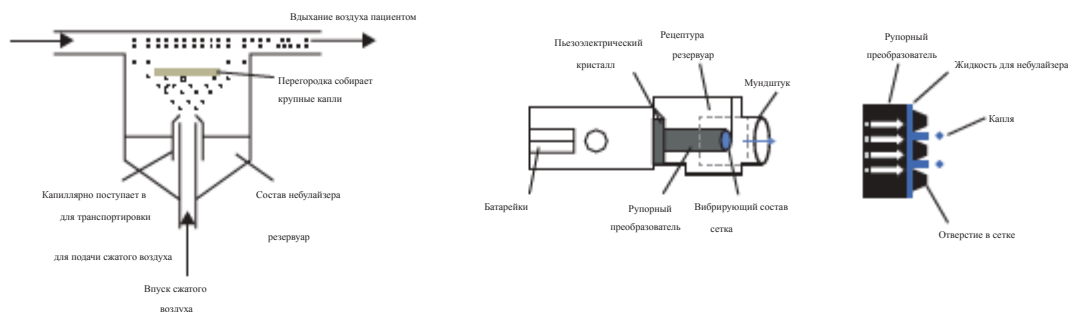
$$l = \frac{(8\pi\gamma)^{1/3}}{\rho f^2}$$

где ρ является константой пропорциональности, γ - поверхностное натяжение раствора, f является плотностью раствора и f представляет собой частоту ультразвуковых колебаний. Размер (среднее число диаметр) первоначально сформированных капель может быть выражен как:

$$D = 0.34l$$

Однако, как и при струйном распылении, конечный диаметр вдыхаемых капель также определяется рециркуляцией более крупных капель, их слипанием и испарением во время вдоха воздушным потоком. Скорость выхода лекарственного средства пропорциональна частоте вибрации, а также концентрации лекарственного средства и объему раствора в небулайзере, но может существовать оптимальная концентрация (Le Brun *et al.*, 2000). Из-за высокой температуры ультразвуковое распыление может быть непригодным для термолabile веществ, включая биофармацевтические препараты, а работа ультразвукового распылителя требует умеренного потребления электроэнергии, что ограничивает миниатюризацию и портативность устройства.

Чтобы устранить недостатки струйных и ультразвуковых небулайзеров, в первом десятилетии XXI века на рынок был представлен последний класс разрабатываемых портативных небулайзеров - небулайзеры с вибросеткой (рисунок 10.5). Основными преимуществами небулайзеров с вибросеткой являются их высокая мобильность и низкие требования к питанию (батарейки типа AA). Образование капель достигается с помощью сетки или мембраны, содержащей множество перфорированных отверстий микронного размера. Диаметр отверстий определяет размер капель первичного аэрозоля, что приводит к получению аэрозолей меньшего размера, чем те, которые образуются струйными и ультразвуковыми распылителями. Распределение капель по размерам также поддается контролю в диапазоне размеров 1-6 мкм. Большая часть первичного аэрозоля пригодна для вдыхания, и для обеспечения рециркуляции более крупных капель не требуются перегородки.



Схемы (а) традиционного воздушно-струйного распылителя и (б) более современного пассивного **Рисунок 10.5** распылитель с вибросеткой, включая увеличение элемента с вибросеткой. Перепечатано из Газанфари *et al.*, (2007). Авторское право © 2007, с разрешения Elsevier.

В настоящее время доступен широкий выбор устройств с вибрирующими сетками, которые широко классифицируются как пассивные и активные устройства с вибрирующими сетками, подходящие для использования при малых объемах заполнения (New-man and Gee-Turner, 2005). В активных устройствах, сетка вибрирует под действием электрического тока, что приводит к вытеснению жидкости из куполообразных отверстий. В пассивных устройствах жидкость выталкивается через отверстия ультразвуковым сигналом, заставляя сетку вибрировать синхронно. В отличие от ультразвуковых распылителей, было показано, что распылители с вибросеткой подходят для доставки суспензий и составов нуклеиновых кислот (Дханд и Сохал, 2008). Дханд и Сохал (Dhand and Sohail, 2008) сообщают, что размеры капель уменьшаются с увеличением вязкости раствора, но чрезмерная вязкость действительно препятствует выходу аэрозольной массы. Распыление усиливается при более высоких концентрациях NaCl (или других проводящих ионов), которые могут быть результатом улучшения электропроводности (Дешпанде *et al.*, 2002). Влияние поверхностного натяжения на распыление с вибрирующей сеткой, по-видимому, менее важно, чем влияние вязкости, но поверхностное натяжение, по-видимому, влияет на массовый выход, а не на размер частиц аэрозоля (Газанфари, 2007). Как правило, небулайзеры с вибросеткой требуют небольшого объема заполнения и создают медленно движущиеся аэрозольные облака, образование которых можно координировать с ингаляцией пациента. Однако существуют проблемы с закупоркой отверстий во время использования.

10.6.1.3 Свойства аэрозоля и применение пациентом при Ингаляциях

Существуют довольно существенные различия в характеристиках различных продаваемых небулайзеров для данного состава (Barry and O'Callaghan, 1998), и это различие привело к нормативному требованию обосновать и детализировать рекомендации конкретного небулайзера для использования с конкретным лицензированным составом. Однако необходимо тщательно продумать метод определения размера частиц, поскольку капли испаряются при более низкой относительной влажности лабораторных условий. Эффект испарения будет зависеть от массовой производительности и типа используемого распылителя (например, струйные распылители охлаждают растворы, в то время как ультразвуковые распылители их нагревают). Следовательно, это уменьшает измеренное *in vitro* распределение по размерам по сравнению с тем, которое вдыхал бы пациент (Berg, Svensson and Asking, 2007). Также важно помнить, что маневр пациента при вдохе (т. е. Дыхательный объем, частота и расход) имеет решающее значение для степени осаждения в легких. Приливное дыхание является важным фактором эффективности при использовании небулайзерной доставки лекарств в условиях искусственной вентиляции легких (Seriana *et al.*, 2003). Существует слабая корреляция между исследованиями осаждения *in vivo* и исследованиями *in vitro* измерениями, когда используются только облака стоячего аэрозоля

оценивается, и поэтому важно, чтобы размер аэрозоля измерялся в условиях приливного дыхания (Сангван, Кондос и Смолдоне, 2003).

Основными факторами, определяющими аэрозольную эффективность распылителя, являются массовый расход, распределение аэрозоля по размерам и период аэрозолизации. Традиционные небулайзеры выделяют аэрозоль в течение всего периода распыления, независимо от того, делает ли пациент вдох или нет. Действительно, потеря аэрозоля может произойти, если пациенты выдыхают в устройство, а не снимают мундштук. Для вдыхания распыленного аэрозоля требуется мундштук или маска для лица. Доставка лекарств через мундштуки выше, чем через незапечатанные маски для лица. Однако не все пациенты могут соблюдать правила использования мундштуков (например, младенцы), а при использовании герметичных масок у детей может происходить осаждение на лице, что приводит к побочным эффектам или раздражению (Brodie and Adalat, 2006).

Значительным ограничением осаждения вдыхаемых аэрозолей в легких является осаждение в ротоглотке, которое может быть сведено к минимуму за счет использования аэрозолей с небольшим диаметром капель (что довольно хорошо достигается с помощью небулайзеров) и за счет того, что пациент вдыхает медленно и с приливом (Smaldone, 2002; Clark *et al.*, 2007). Вентилируемые распылители решают проблему, присущую традиционным струйным распылителям, в которых воздушного потока обычно недостаточно для дыхания приливами, позволяя вдыхать дополнительный подпиточный воздух через распылитель, тем самым улучшая захват капель и уменьшая коалесценцию (Le Brun *et al.*, 2000). Самые современные вентиляционные системы также содержат клапаны направленного потока, которые позволяют выдыхаемому воздуху отводиться из зоны аэрозолизации. Небулайзеры с вентиляцией при дыхании сконструированы с двумя клапанами, которые закрываются попеременно при вдохе и выдохе, так что, когда пациент не вдыхает, ни один аэрозоль не может выйти из небулайзера. В результате производительность, как правило, повышается в небулайзерах с открытым дыханием по сравнению с обычными струйными небулайзерами (Le Brun *et al.*, 1999).

Одним из основных достижений в области доставки лекарств распылением стало использование знаний о том, что региональное осаждение лекарств определяется объемом и временем вдыхания аэрозоля в течение дыхательного цикла (марка *et al.*, 1999). На центральные проводящие дыхательные пути можно воздействовать с высокой частотой вдоха (Clark *et al.*, 2007) и небольшими объемами вдоха (Хейдер, 2004), тогда как низкие скорости потока, ранняя болюсная ингаляция и задержка дыхания способствуют отложению в альвеолах (Беннетт *et al.*, 2002). Можно не только направлять осаждение в центральные / периферические дыхательные пути, но и воздействовать на конкретные анатомические области легких (например, осаждение в определенной доле), ограничивая расширение легкого в положении лежа, в вертикальном положении и полулежа. Адаптивные системы доставки аэрозоля используют микрокомпьютерный контроль, который может адаптировать доставку лекарства к ингаляционному циклу пациента и пульсирует аэрозолем болюсно в течение правильного периода ингаляции для достижения желаемого эффекта осаждения лекарства. Это обеспечивает возможность целенаправленного осаждения лекарственного средства, позволяя максимизировать системную абсорбцию и улучшая осаждение лекарственного средства в плохо вентилируемых зонах (Scheuch *et al.*, 2006). Внедрение таких технологий в портативные сетчатые небулайзеры дает возможность продвинуть разработку регионального таргетирования при доставке лекарств в легкие.

10.6.2 Системы дозированных ингаляторов под давлением

Разработка pMDI в 1950-х годах компанией Riker Laboratories стала крупным скачком в респираторной терапии, впервые разработано компактное, портативное и экономичное устройство для доставки лекарств, которым легко пользоваться, хотя и не всегда правильно. Продукт pMDI состоит из активного фармацевтического ингредиента (в виде раствора или суспензии) и

сжиженное топливо с наполнителями, заполненное в канистру и закрытое дозирующим клапаном. Дозирующий клапан ограничивает объем, который может быть выдан при приведении в действие. Баллон помещается в пластиковый приводной патрубок, содержащий распылительное отверстие, которое распыляет аэрозоль. Ранее одной из самых серьезных проблем в аэрозольной медицине был принудительный поэтапный отказ от озоноразрушающих хлорфторуглеродных (ХФУ) пропеллентов, первоначально использовавшихся в дозированных ингаляторах (ДИ), но их замена гидрофторалкановыми (ГФА) пропеллентами открыла возможности для улучшения портативной аэрозольной терапии. PMDI по-прежнему являются наиболее используемыми устройствами во всем мире, причем их использование растет, особенно в развивающихся странах (Группа по технологии и экономической оценке, 2009). Несмотря на преимущества устройств PMDI, метаанализ исходов заболевания показал, что большинству пациентов не удастся достичь оптимального эффекта от терапии PMDI (Броклбанк, Рам и Райт, 2000).

10.6.2.1 Стратегии приготовления дозированных ингаляторов

Рецептура лекарственных средств, вспомогательных веществ и пропеллентов может представлять собой раствор или суспензию микронизированных частиц в жидком топливе. Пропеллент испаряется, заполняя головное пространство канистры, и быстрое испарение летучего пропеллента при открытии дозирующего клапана обеспечивает усилие для выталкивания содержимого при приведении в действие. Традиционно продаваемые препараты производились в виде суспензий из-за их способности контролировать физико-химические свойства частиц и максимизировать химическую стабильность препарата.

Переход с пропеллентов с ХФУ на ГФА, вынужденный экологическими соображениями, изначально включал в себя подготовку биоэквивалентных заменяющих "фирменных генерических" составов, по существу заменяющих суспензию ХФУ суспензией ГФА (Келлер, 1999). Однако физико-химические свойства пропеллентов на основе ГФА отличаются от свойств ХФУ; в частности, профиль растворимости вспомогательных веществ, необходимых для стабилизации суспензий, не был достаточно высоким в ГФА (Vervae and Byron, 1999), и пропелленты были несовместимы с компонентами клапанов. Изменяя компоненты клапана, стало возможным производить эквивалентные суспензии HFA для таких лекарств, как флутиказона пропионат (Kunka *et al.*, 2000). Растворяющие свойства пропеллентов на основе ГФА создали как проблемы, так и возможности для улучшения аэрозольной терапии.

10.6.2.2 Пропелленты на основе ингаляционных аэрозолей

Пропеллент составляет более 80% состава большинства аэрозолей PMDI, и их высокое давление паров обеспечивает энергию, необходимую для достижения распыления аэрозоля при приведении в действие устройства PMDI. Следовательно, важными свойствами топлива являются его токсичность, давление паров, растворимость, воспламеняемость и плотность (Noakes, 2002), все из которых определяют характеристики состава и эффективность работы. Пропелленты на основе ГФА появились в результате поиска в других отраслях промышленности замены ХФУ, например, в качестве пенообразователей и хладагентов. Физические свойства выбранных пропеллентов на основе HFA (HFA134a и HFA227ea) представлены в таблице 10.3 вместе с свойствами пропеллентов на основе ХФУ, которые они были разработаны для замены.

Очевидными различиями являются более низкие температуры кипения обоих пропеллентов на основе ГФА, что приводит к более высокому давлению пара, и невозможность смешивать пропелленты для того, чтобы регулировать давление пара. Низкая температура кипения означает, что технология холодного розлива (при которой производство осуществляется в открытых емкостях и заливается в охлажденном, сжиженном состоянии) является дорогостоящей. Низкая плотность порохов ХПД также создает трудности с обеспечением стабильной

Таблица 10.3 Свойства HFA.

Свойства HFA		Постоянная момента					
Точечное	Параметр дипольной	поляризуемости диэлектрика					
давление кипящего	растворимости	Δ(m ³ МОЛ					
пара(°C) (кПа,	Гильдебранда при 20 °C)°	× 10 ⁶)					
° при 20°C)							
CFC 11	23.8	89	1.49	7.6	0.46	2.3	2.8
CFC 12	- 29.8	566 182	1.33	6.1	0.51	2.1	2.3
CFC 114	3.6	572	1.47	6.4	0.50	2.3	3.2
HFA 134a	25.8 -	390	1.23	6.6	2.06	9.5	6.1
HFA 227ea	-17.3		1.42	6.6	0.93	4.1	6.1

суспензии, в которых более плотные взвешенные кристаллы лекарственного средства быстро осаждаются в сжиженном топливе с более низкой плотностью. Что касается растворимости, пропелленты HFA обладают значительно большим диполем, что приводит к сравнительно более высокой растворимости в воде и лекарственных веществах (Vervae and Byron, 1999; Hoey, Gupta and Myrdal, 2008), но, наоборот, снижает растворимость для поверхностно-активных веществ, стабилизирующих суспензию. Последствиями изменений растворимости являются потенциальное осаждение взвешенных частиц при попадании воды, необратимое созревание по Оствальду суспензий и, в случае беклометазона дипропионата, медленное образование с HFA134a сольвата, который делает суспензии нестабильными (Vervae and Byron, 1999).

Некоторые стратегии для решения проблемы рецептуры заключаются в смешивании HFA134a и HFA227ea (Williams and Liu, 1998), растворении соразтворителей, таких как этанол, глицерин и полиэтиленгликоль (Brambilla *et al.*, 1999) или разработать новые классы поверхностно-активных веществ (Peguín and da Rocha, 2008). Растворение дополнительного наполнителя предлагает одно из наиболее приемлемых решений, из-за изменения давления паров, плотности и вязкости препарата. Смеси ГФА с соразтворителями обычно демонстрируют отклонение от идеальных растворов (Williams and Liu, 1998; Vervae and Byron, 1999). Однако добавление соразтворителя, такого как этанол, открывает возможность растворения поверхностно-активных веществ, и может быть получена суспензия сульфата салбутамола, стабилизированная олеиновой кислотой (заменяющая суспензию основания салбутамола), которая может быть получена и реализована (Росс и Габриэ, 1999). Наибольшее влияние на терапию оказало использование соразтворителей и других растворимых добавок для приготовления растворов молекул лекарственных средств, таких как беклометазона дипропионат или формотерол (Acerbi, Brambilla and Kottakis, 2007), которые обладают потенциалом улучшить профиль отложения лекарственных средств в легких или соответствовать существующим суспензиям за счет разработки рецептур.

10.6.2.3 Факторы, определяющие аэрозользацию продукта

При приведении в действие рМДИ открытие дозирующей камеры для повышения атмосферного давления через распылительное отверстие способствует мгновенному испарению топлива и выталкивает двухфазную газожидкостную смесь через распылительное отверстие, что приводит к образованию распыленного аэрозольного облака (Versteeg, Hargrave and Kirby, 2006). Затем летучее пропеллентное вещество испаряется в аэрозольной фазе, оставляя остаточный аэрозоль, содержащий лекарственное средство. Свойства аэрозольного облака определяются составом препарата и "оборудованием" конструкции дозирующего клапана. В оптимизации производится постановка, первый кон- siderация является ли приостановление раствором препарата, должны быть изготовлены. Суспензии обычно предпочтительнее из-за возможности повышения химической стабильности. Самый простой состав состоит из пропеллента и диспергированного лекарственного средства. Давление паров

концентрация пропеллента будет приблизительно равна концентрации самого чистого пропеллента, что приведет к образованию быстро движущихся аэрозольных облаков при срабатывании и, возможно, к небольшим размерам капель аэрозоля. Присутствие растворенного вещества (например, стабилизирующие агенты или cosolбыл- Вентс) снижает давление пара и, следовательно, может увеличить аэрозольных капель диаметр (Штайн и Мюрдал, 2004).

В случае суспензионных pMDI важны факторы, определяющие распыление, а также объемная концентрация частиц в топливе, исходное распределение по размерам этих частиц, возникновение агрегации частиц и однородность дисперсии частиц (Gonda, 1985; Хаким и Гонда, 1988). Образование стабильной суспензии имеет решающее значение для определения аэродинамического распределения вдыхаемого аэрозоля по размерам и обеспечения воспроизводимости дозы. Стабильность суспензии определяется совместимостью частиц с топливом, облицовкой канистры (Майкл *et al.*, 2000) и компоненты клапана (Betty, 2004, Пейрон *et al.*, 2005). Частицы могут агрегироваться в жидком топливе или во время испарения капель, в результате чего распределение частиц по размерам после распыления отличается от распределения исходных частиц. Например, РЭС-ригидные фракции от xinafoate Салметерол и флутиказона пропионат pMDIs уменьшается в результате агрегации дисперсных частиц в суспензии (Марнэна, Мартин и Марриотт, 20086).

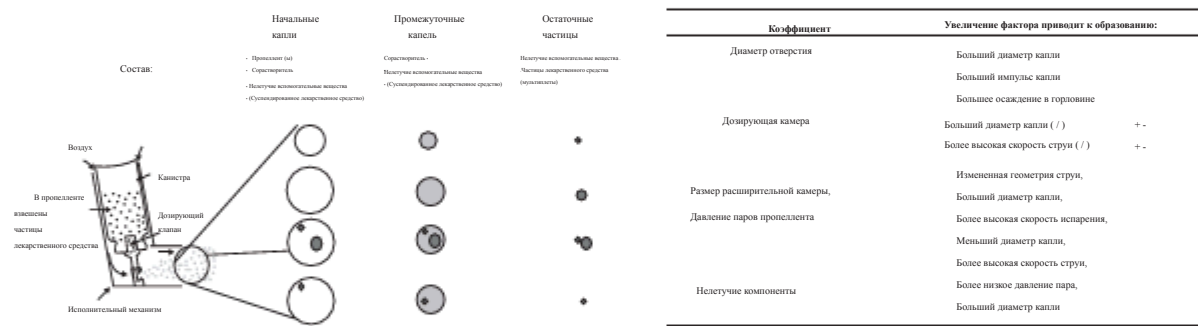
Частицы образуются из составов pMDI типа растворов путем испарения капель про-гранулята после приведения в действие. Размер капель в струе зависит от диаметра распылительного отверстия (брамбиллы *et al.*, 1999; Берри *et al.*, 2003), конструкция привода (Smyth, 2003), объем, измеряемый клапаном, и давление пара, определяющее выброс через отверстие (Brambilla *et al.*, 1999; Верве и Байрон, 1999). Присутствие нелетучих компонентов, таких как лекарственные препараты, поверхностно-активные вещества или сорастворители, снижает давление пара, и это может привести к увеличению размера капель. Однако пропеллер с высоким давлением паров может привести к попаданию капель на устройство или в горловину при распылении. Если увеличить диаметр отверстия, этот баллистический эффект может быть более выраженным (Betty, 2003). Таким образом, размер капель аэрозольного облака определяется взаимодействием между приводом, устройством и параметрами рецептуры (Brambilla, *et al.*

et al

1999; Берри *et al.*, 2003; Смит *et al.*, 2006; Штайн и Мюрдал, 2006). Основные эффекты отдельных факторов суммированы на рисунке 10.6. Однако в целом верно, что аэродинамическое распределение раствора по размерам меньше, чем у суспензии (Крэмpton, Киннерсли и Айрес, 2004). Одним из особых преимуществ является способность "настраивать" размер капель для достижения осаждения на периферии легких или для минимизации вариабельности при проведении осаждения в дыхательных путях (Ачерби, Брамбилла и Коттакис, 2007).

10.6.2.4 Свойства аэрозоля и осаждение в легких

Основным преимуществом pMDIs является то, что аэрозольные облака образуются независимо от дыхательных усилий пациента благодаря распыляющей силе высоколетучего пропеллента. Однако это преимущество также является серьезным ограничением терапии pMDI, поскольку облако аэрозоля образуется за короткий промежуток времени и перемещается с высокой скоростью, а это означает, что пациенты должны иметь возможность координировать момент срабатывания и вдыхание, чтобы максимально увеличить отложение лекарственного средства в легких. К сожалению, где-то в районе 50% пациентов не могут правильно использовать свой pMDI даже при соответствующей подготовке (Barnes, 2004); наиболее распространенной ошибкой является несоблюдение координации приведения в действие-вдоха, при этом некоторые пациенты прекращают вдох.



Принципы работы pMDI, в котором состав может состоять из растворенного активного фармацевтического ингредиента или Рисунок

10.6 суспендирован в смеси пропеллента и соразстворителя.

Использование традиционных ингаляторов на основе ХФУ приводило к отложению в легких 10-20% (Pauwels, New- man and Borgstrom, 1997), и даже у пациентов, прошедших обучение и продемонстрировавших правильную технику, отложение в легких составляло менее одной трети введенной дозы (Newman *et al.*, 1998). Основным фактором, способствующим низкому отложению pMDI в легких, является обширное отложение в ротоглотке, обусловленное баллистической природой аэрозолей pMDI (Ньюман и Чен, 2008).

Внедрение препаратов pMDI на основе HFA предоставило возможность улучшить отложение лекарственных средств в легких. Чтобы разработать способы улучшения осаждения лекарственных средств, сначала необходимо рассмотреть свойства аэрозоля, производимого pMDIs. Баллистическое осаждение определяется физическими свойствами аэрозольного облака, включая размер частиц, геометрию струи и скорость струи. Уменьшение аэродинамического диаметра частиц увеличивает прохождение через ротоглотку и, следовательно, отложение в легких (Smaldone, 2006). Обычно утверждается, что составы ГФА обладают меньшим размером частиц, чем составы ХФУ, и поэтому должны обеспечивать низкое осаждение в ротоглотке и повышенное в легких. Дипропионат QVAR беклометазона, который представляет собой раствор HFA/ этанола продукт (массовый средний аэродинамический диаметр, MMAD, 1,1 мкм), улучшает отложение в легких по сравнению с суспензией CFC, для замены которой он был разработан (MMAD 3,5 мкм) (Leach, 1998; Leach, 2005). Однако многие составы были разработаны для соответствия MMAD составов ХФУ, которые они заменили (например, Фликсотид™ флутиказона пропионат, Вентолин™ сальбутамола сульфат и Серевент™ салметерола ксинафоат), которые демонстрируют в целом сходные доли отложений в легких. Таким образом, неточным является вывод о том, что аэрозоли ГФА всегда имеют меньший размер частиц и более высокое осаждение в легких - это зависит от составов.

Основная трудность заключается в том, что аэрозоли сверхтонкого ГФА все еще демонстрируют высокое осаждение в ротоглотке - отложение геля, варьирующееся примерно от 30 до 56% от введенной дозы, в зависимости от техники (Лич, 1998). Пациент вдыхает динамическое аэрозольное облако из капель пропеллента, содержащих лекарственное средство, которые подвергаются испарению, конкурирующему с коагуляцией капель, и старению в турбулентном потоке. Размер капель зависит от качества потока жидкости в расширительной камере pMDI и перепада давления на распылительном отверстии. Следовательно, давление паров препарата и вязкость взаимодействуют с диаметром распылительного отверстия, определяя момент выпуска и распыления аэрозоля. Более высокое давление паров ГФА приводит к образованию капель меньшего размера, чем в топливе на ХФУ, но эти капли обладают более высокой скоростью (Данбар, 1997; Данбар и Миллер, 1997). Трудность с оценками скорости и размера капель заключается в неоднородности того и другого в зависимости от времени после срабатывания, при этом выброс жидкости длится примерно до 200 мс (Дун- бар).....". - , Уоткинс и Миллер, 1997а). Было обнаружено, что начальные скорости HFA вблизи распылительного отверстия варьируются от 16 до 58 м с⁻¹ (Кросленд, Джонсон и Матида, 2009). Однако,

на расстоянии 10 см от распылительного отверстия скорость колеблется от 15 до 5 м/с.⁻¹

зависимости от времени приведения в действие (Данбар, Уоткинс и Миллер, 1997b). Ряд представленных

на рынке формул демонстрирует, что несколько CFC-pMDI имеют схожие скорости ($\approx 6 \text{ м с}^{-1}$), но некоторые суспензии HFA действительно имеют высокую скорость капель ($5,1\text{--}8,4 \text{ м с}^{-1}$)

(Hochrainer *et al.*, 2005). Увеличенная продолжительность распыления выгодна пациентам,

которым трудно координировать действие, при условии, что они продолжают вдыхать облако аэрозоля.

Важно отметить, что продолжительность струи, скорость и сила удара на расстоянии 5 см от

мундштука привода могут быть изменены путем соответствующих манипуляций с составом и выбора

распылительного отверстия (Росс и Габрио, 1999; Ачерби, Брамбилла и Коттакис, 2007). Координация

в

на расстоянии 10 см

следовательно, это не является полным объяснением отложения препарата в ротоглотке при использовании PMDI, и даже при использовании ингаляторов с автоматическим приводом от дыхания или у пациентов, которые демонстрируют адекватную технику, PMDI оказываются чрезвычайно эффективными при осаждении препарата во рту и глотке. 10.6.2.5 *Вспомогательные устройства для оптимизации подачи аэрозоля*

Чтобы уменьшить отложения в ротоглотке, в конце 1970-х были введены вспомогательные устройства, называемые "распорками", которые быстро приняли форму клапанных удерживающих камер (VHC).

VHC являются элегантным решением проблемы высокого отложения PMDI в ротоглотке, временно разделяя события приведения в действие и вдоха. Обычно считалось, что баллистическая фракция улавливается путем осаждения внутри самих УКВ. Следовательно, осаждение мелкодисперсных частиц в легких (т.е. Масса мелкодисперсных частиц) остается неизменным при использовании VHC, но доля внегрудочного осаждения снижается (Ньюман и Ньюхаус, 1996). Однако, ситуация может быть не совсем такой однозначной; например, значительное отложение будесонида в ротоглотке было показано для будесонида (Турбухалер).[®]

и рPMDI плюс спейсер у пациентов с астмой

(Херст *et al.*, 2001) и было показано, что относительная биодоступность в легких увеличивается при использовании VHC для салметерола / флутиказона пропионата (Nair *et al.*, 2009). В попытке понять доставку лекарственного средства с помощью спейсеров важно учитывать взаимодействие между временем пребывания и скоростью ингаляционного потока, которые взаимодействуют для определения партиклинового депонирования (Verbanck

Важность депонирования дозы в VHC заключается в ее взаимосвязи с эффективностью депонирования лекарственного средства. В ранних исследованиях сообщалось о значениях сохранения дозы в VHC для сальбутамола порядка 50-80% (Dubus and Dolovich, 2000) с последующим снижением депонированной дозы в легких (Pierart *et al.*, 1999). Приводимая в действие доза от рPMDI состоит из капель большого диаметра и импульса, которые подвергаются процессу испарения и эволюции распределения частиц по размерам. Существует четкая зависимость от конструкции VHC (Холл *et al.*, 2011): осаждение распылением в VHC, вероятно, будет выше для камеры небольшого объема. И наоборот, камеры большого объема снижают концентрацию аэрозоля, что требует более длительного времени вдоха, многократных ингаляций для людей с небольшими объемами легких (Schultz *et al.*, 2010), потенциальное осаждение и большая площадь поверхности для осаждения. Следовательно, степень отложения спейсера зависит от времени пребывания аэрозоля в VHC, а также объема вдоха и скорости потока (Barry and O'Callaghan, 1999).

Интересно, что удержание дозы в VHC уменьшается после многократных срабатываний (Clark and Lipworth, 1996), а доставка дозы через спейсер, покрытый антистатическим слоем, улучшает доставку лекарства и устраняет влияние продолжительности пребывания аэрозоля в VHC (О'Каллаган *et al.*, 1993; Кларк и Липворт, 1996). Пропелленты и вспомогательные вещества рPMDI могут поддерживать заряд. В результате трибоэлектрификации при распылении с высоким сдвигом мелкие частицы аэрозоля приобретают заряд (О'Лири *et al.*, 2008), который варьируется от лекарственного средства к лекарственному средству. Простая стирка с использованием моющего средства может обеспечить антистатический слой на прокладке; однако это зависит от сотрудничества пациента и обслуживающего персонала и зависит от различий в методах стирки и сушки. Использование антистатических пластиков является более рациональным подходом к снижению вариабельности дозы при использовании ВКГ. Это устраняет потенциальную вариативность в методах промывки и привело к внедрению электропроводящих VHC, таких как metal NebuChamber[™] в 1990-х годах (Bisgaard *et al.*, 1995). Несмотря на их преимущества в достижении

селективные, направленные на отложение в легких, спейсеры редко используются у детей, находящихся под педиатрическим наблюдением (35%), и они являются наименее предпочтительной лекарственной формой у взрослых (Митчелл, Копполо и Нагель, 2007).

10.6.3 Вдыхание сухого порошка

Первым аппаратом DPI, разработанным для доставки пенициллиновых антибиотиков, был Abbott Aero-haler™ в 1940-х годах. В двадцатом веке существовало две основные движущие силы развития DPI. Поскольку доза, которая может быть доставлена с помощью pMDIs, ограничена объемом дозирующего клапана (максимум ~ 100 мкл), возникла потребность в портативной лекарственной форме, которая могла бы доставлять высокие дозы активного фармацевтического ингредиента. Это привело к разработке в 1967 году Intal™ Spinhaler™, содержащего кромогликат натрия. Вторым важным фактором была необходимость поиска альтернатив использованию пропеллентов на ХФУ в соответствии с Монреальским протоколом, что привело к наблюдению о том, что эффективность доставки лекарств может быть повышена с помощью технологий DPI. Подобно небулайзеру и системам доставки лекарств pMDI, для систем DPI требуется состав, содержащий ингаляционное лекарственное средство, и устройство для диспергирования состава в аэрозоль. DPI могут представлять собой либо устройства с разовой дозой, в которых формуляр обычно содержится в капсуле, либо устройства с несколькими единичными дозами, в которых препарат содержится в серии блистеров с единичной дозой на полосках. Также производятся многодозовые устройства, в которых препарат содержится в резервуаре и дозируется пациентом перед ингаляцией, во многом как в pMDI. В большинстве ИПИ частицы вдыхаемого лекарственного средства распыляются самим пациентом за счет инспираторного маневра; однако, в последние годы были разработаны активные устройства, которые используют внешнюю энергию (например, сжатый воздух) для достижения аэрозолизации. Таким образом, необходимо учитывать три основных компонента: частицы ингаляционного лекарственного средства, порошкообразный состав и взаимодействие между пациентом и его устройством (рис. 10.7).

10.6.3.1 Физико-химические свойства и поведение вдыхаемых порошков

Трудно добиться аэрозолизации порошков микронного размера из системы DPI. Микронизированные порошки демонстрируют высокое отношение площади поверхности к массе и взаимовлияние частиц силы, возникающие из-за поверхностных явлений, доминируют над гравитационными силами. Основное взаимодействие-

взаимодействия между частицами размером 20 мкм являются ван-дер-ваальсовыми силами и электростатическими



Рисунок 10.7

Примеры конструкций обычных пассивных ингаляторов с сухим порошком.

взаимодействия (Schubert, 1981) (которые особенно актуальны для частиц, которые подверглись недостаточному измельчению). При наличии достаточной относительной влажности, капиллярных сил и "против" - дань активно interparticulate преодоление сил (Цена *et al.*, 2002). Результатом высоких сил взаимодействия частиц является то, что порошки демонстрируют высокую когезионную способность, а частицы образуют прочные порошковые агломераты (Weiler *et al.*, 2010). Порошки также обладают высокой адгезией и прилипают к другим поверхностям (например, к приборам). Как следствие, нарушается текучесть порошка, что затрудняет равномерное заполнение ингаляционных твердых частиц лекарственного средства в устройствах, блистерах или колпачках. Не меньшую озабоченность вызывает то, что сила сцепления частиц микронного размера должна быть преодолена для достижения дезагрегации порошка при вдыхании, что приводит к низкой и сильно изменяющейся вдыхаемой доле частиц лекарственного средства микронного размера.

Во время вдыхания порошков в DPI происходят три - часто одновременных - процесса, которые приводят к аэролизации частиц: псевдооживление слоя порошка, унос частиц и деагрегирование. Он имеет условно считалось, что aerosolisation возникает из deaggregation, вызванной аэродинамических поперечных сил (Цзэн, Мартин и Marriott, 2001). Распыление требует как учета сил взаимодействия между отдельными частицами, которые должны преодолеваются силами рассеивания, так и понимания свойств сыпучих порошков, например, силы взаимодействия между агломератами, структура порошка и воздухопроницаемость. Агломераты обладают меньшей прочностью, когда размер первичных частиц больше, а частицы с шероховатыми поверхностями имеют меньшую площадь контактной поверхности (Tang, Chan and Raper, 2004). Что касается мезо- и макромасштабов порошка, то агломераты и порошки с низкой насыпной плотностью легче захватываются, а частицы с низкой поверхностной энергией способствуют лучшему диспергированию и деагломерации в воздушном потоке (Chow *et al.*, 2007). В последние годы стало очевидно, что аэродинамические силы сдвига являются не единственной причиной аэролизации: также важны случаи столкновения агломератов внутри устройства DPI (Wong *et al.*, 2010).

Во многих отношениях частицы, образующиеся в результате микронизации, не идеальны для получения аэрозолей в виде сухого порошка. Микронизация приводит к разрушению поверхности кристаллических частиц, а высокая поверхностная энергия микронизированных частиц способствует их плохому аэролизации и рассеиванию. Области беспорядка также представляют собой "горячие точки" атмосферной сорбции, которые могут привести к перекристаллизации аморфного материала (Уорд и Шульдц, 1995; Прайс и Янг, 2004) с возможностью образования мостиков между твердыми частицами, что является барьером для деагломерации. Чувствительность неупорядоченных участков к влажности является источником нестабильности и изменчивости прочности агломерата и когезии порошка. Реальная трудность заключается в изменчивости свойств внутри смеси, что означает, что партии микронизированных порошков содержат субпопуляции с гетерогенной восприимчивостью к деагломерации (Таки *et al.*, 2011). В результате чистые микронизированные порошки лекарственных средств агломерируются, что при аэролизации приводит к образованию большой фракции агломератов крупного размера (рис. 10.8).

Чтобы получить некоторый контроль над трудностями, возникающими при аэролизации сухих порошков, были разработаны различные подходы к разработке частиц, направленные на контроль поверхности, размеров, формы и плотности частиц и, таким образом, манипулирование силами агломерации и структурой порошковой смеси (Chow *et al.*, 2007). Также могут быть использованы стратегии приготовления, включая добавление небольших количеств частиц сахара мелкого размера (Jones and Price, 2006), которые изменяют структуру агломерата или смеси (макро). Альтернативные стратегии включают нанесение покрытий компонентами с низкой поверхностной энергией, такими как L-лейцин или фосфолипид, либо путем смешивания порошка, либо путем конструктивного производства от капли к частице. Такие подходы к формулировке пытаются изменить силы взаимодействия частица-частица (Лукас,

Андерсон и Станифорт, 1998; Геллер, Вирс и Хойердинг, 2011) и улучшают

деагломерацию мелких частиц (рис. 10.8).

10.6.3.2 Порошкообразные составы

Большинство методов респираторной терапии требуют вдыхания низких доз (обычно <1 мг), при которых практически невозможно добиться однородности наполнения и ингаляционной дозы. Необходимо смешивать ингаляционные частицы с разбавителем, таким как частицы моногидрата лактозы, чтобы сформировать упорядоченную смесь или гранулят с использованием соответствующей увлажняющей жидкости, с добавлением наполнителя или без него для облегчения дозирования. По счастливой случайности, первоначальное желание растереть путем смешивания с лактозой также улучшило текучесть и аэролизацию ингаляционных частиц лекарственного средства. В качестве наполнителя чаще всего используется кристаллический моногидрат лактозы, который обычно называют "частицей-носителем", поскольку его размер больше, чем у микронизированных частиц. Использование частиц-носителей обеспечивает дополнительный уровень взаимодействия с препаратом: частицы лекарственного средства могут прилипать к поверхности носителя непосредственно или в виде агломератов (рис. 10.8). Многие частицы лекарственного средства вступают в сильное адгезивное взаимодействие с частицами лактозного носителя, что приводит к плохому повторному диспергированию при аэролизации смеси (Хинди и Байрон, 1995). Некоторые из свойств носителя, которые были определены как важные для получения частиц, способных к адекватному диспергированию, следующие: шероховатость поверхности и форма кристаллов носителя (Larhrib *et al.*, 2003a, 2003b; Ислам *et al.*, 2005), размер и сорт частиц-носителей (Ислам *et al.*, 2004a), кристалличность носителя (Салим, Смит и Телко, 2008), соотношение лекарственного средства к носителю (Дикхофф *et al.*, 2003; Молодой *et al.*, 2005) и интенсивность смешивания (Дикхофф *et al.*, 2003).

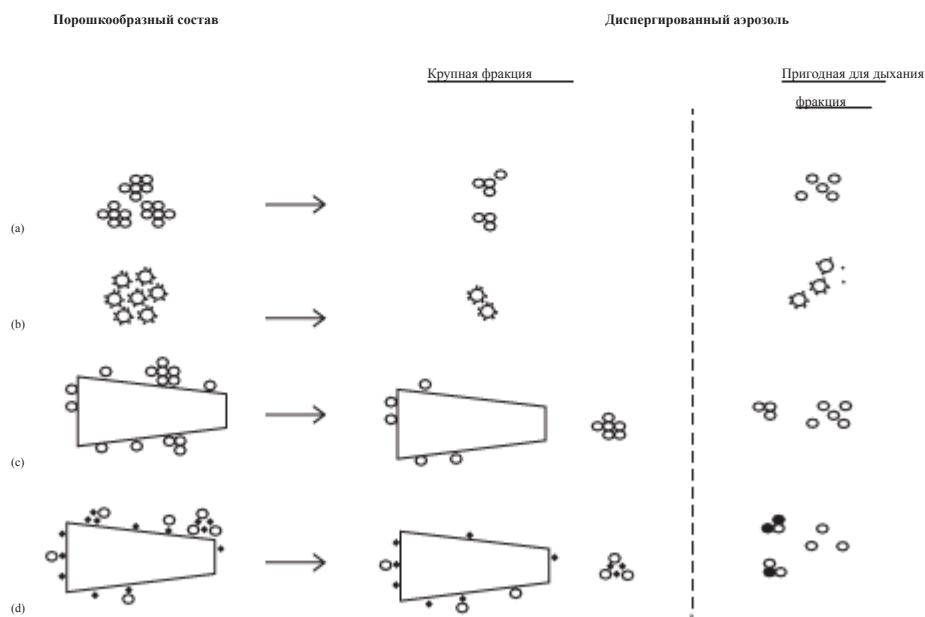


Схема (а) микронизированной лекарственной частицы в чистом виде, (b) микронизированной лекарственной добавки, Рисунок 10.8 (с) составы DPI на основе носителей и (d) составы DPI на основе носителей / добавок.

Механическая активация поверхности частиц лекарственного средства путем микронизации является источником физико-химической нестабильности и неоднородности сил взаимодействия носитель-лекарственное средство и носитель-агломерат (Берард *et al.*, 2002). Микронизация ответственна за изменение адгезионных сил в смесях DPI (Davies *et al.*, 2005), что влияет на однородность смеси. Вызывает беспокойство то, что физическая нестабильность со временем приведет к изменению характеристик порошка (Джоши, Дживеди и Уорд, 2002). Капиллярные силы адгезии между лекарственным средством и носителем (Цена *et al.*, 2002) увеличиваются, когда влага конденсируется в неупорядоченных областях поверхности микронизированных частиц. Таким образом, составы на основе носителя часто демонстрируют низкую эффективность аэрозользации ингаляционного лекарственного средства. Низкая эффективность составов может быть объяснена и даже улучшена с помощью разработки рецептур (например, с использованием адгезионных средств для контроля силы (Zhou *et al.*, 2010) или добавление тройных рассеивающих агентов (Ислам *et al.*, 2004b)). Маловероятно, что составы на основе носителя исчезнут для большинства методов лечения DPI, и, следовательно, необходимо оптимизировать эффективность смешивания и получить более глубокое представление о роли структуры порошка в аэрозользации, а также разработать стратегии устройства, которые уменьшают неоднородность свойств порошка.

et al

10.6.3.3 Пациент и устройство

Аэрозользация происходит, когда пациент вдыхает через устройство, создавая перепад давления, который приводит к псевдооживлению порошка, его уносу и деагломерации. Для того чтобы добиться эффективной деагломерации вдыхаемых частиц, требуется быстрая и сильная ингаляция. Высокий поток воздуха через устройство с низким сопротивлением (или более низкий поток воздуха через устройство с высоким сопротивлением) создает аэродинамические силы сдвига, турбулентность и соударение, необходимые для получения фракций с высоким содержанием вдыхаемых веществ (Шричана, Мартин и Марриотт, 1998). К сожалению, многие пациенты не смогли бы эффективно вдыхать через устройство с высоким сопротивлением. *In vitro* исследования аэрозользации показывают, что микронизированный лекарственный препарат, смешанный с носителем, дает относительно низкую эффективность. Поэтому неудивительно, что традиционные препараты DPI демонстрируют плохую способность к депонированию в легких - всего лишь 5-28% дозы депонируется в легких из DPI (Pauwels, Newman and Borgstrom, 1997). Хотя эта цифра относится к относительно старым устройствам и к составам без включения агентов тройного состава, в целом верно сказать, что *in vivo* осаждение хуже по сравнению с *in vitro* тестированием.

Пациенты с заболеваниями легких не могут вдыхать с необходимой силой через свое устройство DPI (Cegla, 2004), что приводит к выбросу низкой дозы DPI (Kamin *et al.*, 2002; Tarsin *et al.*, 2006). Доля препарата, доступная для депонирования в легких, является неоптимальной для многих пациентов с заболеваниями легких (Бисгаард *et al.*, 1998; Бернелл *et al.*, 2001; Kamin *et al.*, 2002). Пациенты с ХОБЛ (даже после инструктажа) вдыхают с меньшей скоростью вдоха, чем астматические пациенты (Broeders *et al.*, 2003), что объясняется силой дыхательных мышц пациентов и гиперинфляцией легких. Чтобы добиться глубокого проникновения аэрозоля в легкие, пациент должен вдыхать с низкой скоростью потока. Требования к аэрозользации (высокий поток ставок), таким образом, несовместимы с повышением периферической осаждения вдыхаемый пар частиц жидкости в Пи, по сравнению с другими ингалятор систем (Торссона причине, что понятие улучшается доставка лекарственных средств в устройствах, которые обеспечивают эффективный порошок распыления (Pauwels *et al.*, 1998). Именно для этого при относительно низких скоростях потока была разработана (например, на AirMax™; Цзэн *et al.*, 2002): устройства, которые включают классификаторы для минимизации межпациентной изменчивости размера аэрозольных частиц (de Boer *et al.*, 2006) или активных устройств, в которых пациенту не требуется вдыхание для распыления частиц лекарственного средства (Мастрандреа и Кваттрин, 2006).

10.6.4 Совершенствование стратегий доставки лекарств

Читателю будет очевидно, что каждая из рассмотренных здесь систем доставки лекарств имеет недостатки, которые предоставляют широкие возможности для исследований и разработок в области доставки лекарств в легкие. Десять лет назад, этот раздел должен был состоять из обсуждения разработки системной доставки белков и пептидов, кульминацией которой стал выход на рынок (и последующая регистрация) Exubera[®] ингаляционного инсулина. Кроме того, в обсуждении заметно отсутствовала почти повсеместная "революция" в области нанотехнологий. Наночастицы демонстрируют увеличенную долю осаждения при размере менее ~ 100 нм (Heyder *et al.*, 1986), но они создают трудности в рецептуре и производстве продукта. Тем не менее, было предложено несколько стратегий, включая композитные частицы из наночастиц (Azarni *et al.*, 2008) и диспергирование в распыленных составах. Действительно, стратегия доставки лекарств в виде наночастиц, включающая распыление водной липосомальной дисперсии, в настоящее время проходит клинические испытания для генной терапии CF (Griesenbach *et al.*, 2011). Использование наночастиц обеспечивает возможность повысить скорость растворения, нацелить их поглощение макрофагами и потенциально избежать мукоцилиарного клиренса. "Технология контролируемого высвобождения" относится к системе доставки лекарственного средства, которая изменяет скорость высвобождения лекарственного средства из препарата сверх той, которая достигается только растворением. Область контролируемого высвобождения при ингаляционной доставке лекарственных средств развивается медленно, из-за ограниченного набора полимеров, которые одобрены для ингаляционной терапии на основе профилей безопасности и токсичности. Одним из примеров является использование мукоадгезивных полимеров (Сакагами *et al.*, 2001) или многокомпонентные микрочастицы и наночастицы, которые увеличивают время пребывания в эпителии и способствуют поглощению клетками (Alpar *et al.*, 2005). Кроме того, Mannkind Corporation разработала платформу для доставки инсулина под названием "Technosphere™", в которой используются производные дикетопиперазина для обеспечения физической защиты полипептида, а также быстрого растворения лекарственного средства в легких (Cassidy

., 2011). *et al*

Уже обсуждалась разработка активных DPI, которые распыляют препарат независимо от усилий пациента, технологий MDI с управлением дыханием для решения проблем координации, миниатюризации и синхронизации ингаляции небулайзеров. Однако многие из этих методов по-прежнему демонстрируют высокое отложение в горле с потенциальными побочными эффектами. В последние 10 лет были проведены значительные исследования технологий ингаляции мягким туманом, при которых для вдыхания пациентом создаются медленно движущиеся аэрозольные облака с увеличенным сроком службы аэрозоля..... Одним из примеров является генератор конденсационного аэрозоля, разрабатываемый Chrysalis Technologies, который заимствует многовековую практику курения для испарения термостабильных лекарств и впоследствии подвергает их контролируемому испарению с целью получения аэрозолей размером 0,25 - 2,0 мкм (Хонг, Хиндл и Байрон, 2002) с прогнозируемым уменьшенным отложением в горле (Уорт Лонг, Хиндл и Дас Чоудхури, 2009). Для многих из новых технологий производства устройств требуются механические или электромеханические компоненты, что может вызвать возражения регулирующих органов (например, последствия отказа устройства во время аварийной ситуации). Однако одним из устройств, получивших одобрение, является Respimat[®]

Ингалятор

Soft Mist™, который был отмечен фирмой "Берингер Инглхайм" бромидом ипратропия.

Респимат[®] представляет собой механическое устройство, содержащее резервуар с лекарственным раствором, в котором механическая энергия сжатой пружины выталкивает дозированный объем раствора при высоком давлении (250 бар) через сопловое устройство, что вызывает столкновение двух высокоскоростных жидких струй, в результате чего образуется медленно движущееся аэрозольное облако. Респимат[®] обеспечивает высокую вдыхаемую фракцию в исследованиях *in vitro*. Устройство обладает рядом рекомендуемых функций, включая отсутствие проблем с координацией (из-за низкой скорости облачности), низкое осаждение в горле и высокую долю осаждения в легких (марка *et al.*, 2008).

обеспечивает

10.7 Тестирование эксплуатационных характеристик продукта

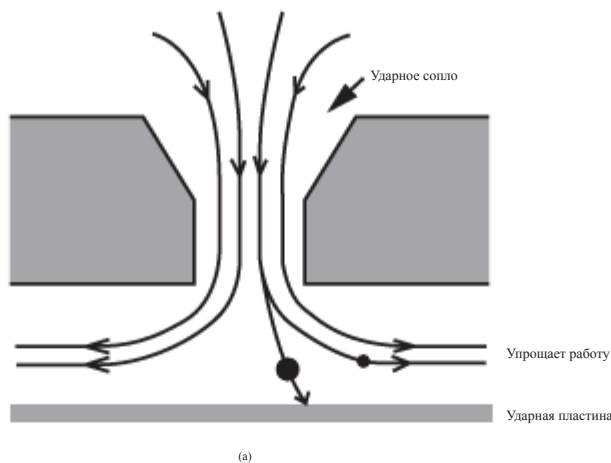
При изучении вдыхаемых аэрозолей используются различные методы, которые являются универсальными для всех отраслей аэрозольной науки. К ним относятся низкоугловой лазерный анализ рассеяния света (лазерная дифракция), анализаторы времени пролета аэрозолей, лазерные доплеровские анометры, велосиметрия изображений частиц и анализаторы динамической подвижности. Область определения характеристик аэрозолей была превосходно рассмотрена Митчеллом *et al.* (2011). К сожалению, многие из методов, которые хорошо известны аэрозольным ученым добиться использования, которое, по сути, сводится к характеристике *terisation* и развития, пожалуй, за исключением лазерный дифракционный анализ, который получил одобрение для использования назальных спреев и капель водных систем. Основным требованием к методике аэрозольной медицины является то, чтобы она обеспечивала измерение массы аэрозоля заданного размера (для конкретного лекарственного средства) таким образом, чтобы можно было оценить доступность аэрозоля в легких. По сути, это относится к испытаниям выпускаемой дозы и аэродинамическому распределению частиц по размерам этой выпускаемой дозы. Вторым компонентом этих тестов является то, что они должны проводиться способом, строго предписанным регулирующими органами в форме национальных и международных стандартов, таких как Британская и европейская фармакопеи. **10.7.1 Испытание на общую излучаемую дозу**

Тестирование дозы выброса проводится для небулайзеров, PMDI и DPIS с использованием корпуса фильтра, который предназначен для улавливания всего аэрозоля, выбрасываемого из ингалятора. Аэрозоль вводится в движущийся воздушный поток, который предназначен для представления условий использования тестируемого ингалятора. Это создает ряд проблем для распылителей и систем DPI. В случае с небулайзерами пациенты вдыхают с помощью приливного дыхания, что означает, что на выделяемую дозу влияют дыхательный объем и частота дыхания (Никандер *et al.*, 2001). Там-план, рекомендуется дыхательные тренажеры быть использован, чтобы привлечь представителя ингаляции сигналов через небулайзер фильтрацию для того, чтобы имитировать эту ситуацию *in vitro*.

В случае пассивных DPI излучение дозы достигается за счет силы, обеспечиваемой требуется маневр пациента при ингаляции и, следовательно, средство стандартизации этого процесса между ингаляторами (Хиндл и Байрон, 1995). Это было достигнуто за счет регулировки расхода воздуха через DPI до такого, который эквивалентен перепаду давления в устройстве в 4 кПа при всасывании 4 л воздуха. Однако эта ситуация далека от идеальной, поскольку пациенты вдыхают не с постоянной скоростью потока через устройство, а скорее с профилем вдоха, который быстро повышается до максимальной скорости вдоха, а затем постепенно снижается (Kamin *et al.*, 2002). Таким образом, для DPI по-прежнему требуются улучшения в стандартизированном тестировании.

10.7.2 Определение аэродинамического размера частиц: анализ инерционного удара

Инерционное соударение - это разделение частиц на фракции аэродинамического размера на основе их различной инерции в движущемся воздушном потоке. Частицы сопротивляются изменению направления движения благодаря своему импульсу (рис. 10.9). Частица с большим аэродинамическим диаметром обладает большим импульсом и инерцией, чем частица меньшего размера, и, следовательно, большей вероятностью осаждения на ударную пластину. Увеличение скорости воздушного потока увеличивает импульс частиц, движущихся в воздушном потоке, тем самым способствуя осаждению твердых частиц. Таким образом, диаметр сопла по ширине при заданном расходе через ударный элемент определяет аэродинамические размеры частиц, которые осаждаются на ступени ударного элемента. Частицы



(a)



(b)

Схема (а) одиночного сопла ступени инерционного импактора и (б) следующего за ним. - Рисунок 10.9 фармацевтический импактор нового поколения (NGI). Цветовое исполнение смотрите в разделе "Табличка".

которые были aerosolised размер-фракционированный чтобы произвести аэродинамический размер частиц Дис- распределение излучаемой дозы, а фракция частиц, что может быть при дыхании затем определены, т. е. мелкие частицы/масс. Большинство современных фармацевтических продуктов тестируются с использованием фармацевтического импактора нового поколения (NGI). NGI был разработан международным консорциумом с целью производства ударного элемента, подходящего для высокопроизводительных потоков до 100 л/мин^{-1} используемый для анализа Пи и с Мин- мум из пяти этапов, используемых для характеристики размера частиц в диапазоне 0,5-5,0 мкм. В результате получается высокоэффективный ударный элемент, который был всесторонне подтвержден как пригодный для проведения ингаляционных испытаний. Тестирование на ударное воздействие позволяет получить информацию о характере взаимодействия рецептуры с составом, влиянии устройства на аэролизацию и, в конечном счете, о пригодности продукта к использованию. Массовое осаждение на данной стадии ударного воздействия определяется после извлечения и химического анализа и преобразуется в совокупное массовое распределение частиц меньшего размера по размерам на основе логарифмической вероятности (О'Шонесси и Раабе, 2003). Тестирование на соударение ограничено тем фактом, что осаждение *in vivo* также зависит от методов имитации и диффузии, а не только от соударения (де Бур *et al.*, 2002).

10.8 Заключение и перспективы

Цель этой главы - обсудить применение аэрозольной науки к фармацевтической терапии и, в частности, изучить методы введения лекарственных средств из наиболее часто используемых лекарственных форм. Есть много вопросов, которые мы намеренно не рассматривали, таких как фармакологические, фармакокинетические и фармакодинамические аспекты ингаляционной терапии. Читатель, без сомнения, заметил, что эта и другие главы частично совпадают, включая, например, физико-химические свойства аэрозолей, осаждение частиц в легких и воздействие частиц аэрозолей окружающей среды, при этом были представлены некоторые аспекты измерения аэрозолей. Ученые, занимающиеся фармацевтическими аэрозолями, сталкиваются с определенными трудностями, которых нет в других областях исследований аэрозолей, поскольку основная задача заключается в том, чтобы превратить то, что по определению является дисперсной системой, в компактный портативный продукт. Поэтому большая часть обсуждения была сосредоточена на различных подходах к составлению рецептов, используемых для производства продуктов, которые по требованию образуют аэрозоли способом, воспроизводимым для удобства использования пациентами.

Трудности с выбором правильной платформы доставки лекарств для пациента очевидны, и по-настоящему универсального ингалятора не существует. Отчасти трудность как для врачей, назначающих лекарства, так и для пациентов заключается в привязке терапевтических средств к платформе запатентованного устройства, а не в действительном удовлетворении потребностей пациентов. В ходе исследования легких наркотиков доставкой было огромным в течение последних 20 лет, предоставляя фундаментальные доказательства факторы, определяющие формулирование показателей, способы оптимизации региональных препаратов депо- приобретение с использованием аэрозолей и механизмы всасывания лекарственных средств и активности в легких. Однако, хотя некоторые из них были в значительной степени решены, многие хорошо известные проблемы все еще стоят перед доставкой лекарств в легкие во втором десятилетии XXI века, включая чрезмерное отложение лекарств в горле и различия между пациентами в эффективности аэрозольной терапии. Многие достижения в фармацевтической аэрозольной терапии стали результатом разработки продуктов для системной доставки биофармацевтических препаратов. Однако эта область сейчас переживает период консолидации, когда уроки системной доставки лекарств применяются для улучшения терапии респираторных заболеваний. Разработка аэрозольных систем, позволяющих контролировать физико-химические свойства, влияющие на осаждение лекарственных средств, и кинетику фармакологических и токсикологических эффектов, остается высоким приоритетом для аэрозольной медицины. С ростом частоты респираторных заболеваний нет сомнений в том, что требуется одновременная разработка аэрозольных лекарственных средств, которые должны обеспечить достаточный импульс для продолжения фармацевтических технологических достижений в области доставки лекарств в легкие .

Список литературы

- Ачерби Д., Брамбилла Г. и Коттакис И. (2007) Достижения в лечении астмы и ХОБЛ- лечение: проведение ингаляционной терапии без ХФУ с использованием module[®] ТЕХНОЛОГИЯ. *Легочный Фармакология и терапия*, 20(3), 290 - 303.
- Эдкок, И.М., Карамори, Г. и Барнс, П.Дж. (2011) Хроническая обструктивная болезнь легких и рак легких: новые молекулярные представления. *Дыхание*, 81(4), 265-284.
- Акбариех М. и Таваши Р. (1987) Морфологические особенности твердых частиц после микронизации в жидкостно-энергетической мельнице. *Международный фармацевтический журнал.*, 35(1-2), 81-89.

- Альпар, Х.О., Сомаварапу, С., Атуа, К.Н. и Брамвелл, В. (2005) Биоразлагаемый мукоадгезивные частицы для доставки назальных и легочных антигенов и ДНК. *Обзоры усовершенствованных методов доставки лекарств*, 57(3), 411-430.
- Андерсон, Дж.М. и Ваниталли, К.М. (1995) Плотные соединения и молекулярная основа для geg- повышение параклеточной проницаемости. *Американский журнал физиологии - Желудочно-кишечный тракт и физиология печени*, 269(4), G467 - G475.
- Астма в Великобритании (2004) *Где мы находимся? Астма в Великобритании сегодня*, Астма в Великобритании, Лондон.
- Азарми С., Лебенберг Р., Роа В.Х. *et al.* (2008) Рецептура и оценка *in vivo* шипучих ингаляционных частиц-носителей для доставки наночастиц в легкие. *Разработка лекарственных средств и промышленная Фармация*, 34(9), 943-947.
- Бейли, А.Г. (1997) Вдыхание и отложение заряженных частиц в легких человека. *Журнал электростатики*, 42(1 - 2), 25 - 32.
- Бейли, А.Г., Гашиш, А.Х. и Уильямс, Т.Дж. (1998) Доставка наркотиков путем вдыхания заряженных частиц. *Журнал электростатики*, 44(1 - 2), 3-10.
- Барнс, П.Дж. (2004) Рекомендации по борьбе с астмой: сравнение рекомендаций с реальностью. *Респираторные заболевания. Медицина*, 98(Дополнение. А), S1 -S7.
- Барри, П.В. и О'Каллаган, С. (1998) Выход лекарственного средства из распылителей зависит от метода измерения. *Европейский респираторный журнал*, 12(2), 463- 466.
- Барри, П.В. и О'Каллаган, С. (1999) Сравнительный анализ размера частиц из- используйте дозированные ингаляторы беклометазона дипропионата, салметерола ксинафоата и флутиказона пропионата, используемые с устройствами Babyhaler, Volumatic и Aergochamber sprayer. *Британский журнал клинической фармакологии*, 47(4), 357-360.
- Бауэр-Брандл, А. (1996) Полиморфные превращения циметидина при производстве твердых лекарственных формы. *Международный фармацевтический журнал*, 140(2), 195-206.
- Бич, С., Лэтем, Д., Сиджвик, К. *et al.* (1999) Контроль физической формы салметерола ксинафоат. *Исследования и разработки в области органических процессов*, 3(5), 370-376.
- Беннетт, У.Д., Браун, Дж.С., Земан, К.Л. *et al.* (2002) Нацеливание на доставку аэрозолей в разные области легких. *Журнал аэрозольной медицины*, 15(2), 179 - 188.
- Bérard, V., Lesniewska, E., Andrès, C. *et al.* (2002) Шкала сродства между носителем и лекарственное средство в DPI исследовано методом атомно-силовой микроскопии. *Международный фармацевтический журнал*, 247(1-2), 127 - 137.
- Берг Э., Свенссон Дж.О. и Аскинг Л. (2007) Определение размера капель в распылителе распространение: метод, основанный на ударном охлаждении. *Журнал аэрозольной медицины: Очистка от отложений и эффекты в легких*, 20(2), 104.
- Берри Дж., Хаймбехер С., Харт Дж.Л. и Секейра, Дж. (2003) Влияние объема дозирующей камеры- и конструкции привода на аэродинамический размер частиц дозированного ингалятора. *Разработка лекарств и промышленная фармация*, 29(8), 865 - 876.
- В. *et al.* (2004) Влияние смазки клапанов на аэродинамику- динамический размер частиц дозированного ингалятора. *Разработка лекарств и промышленная фармация*, 30 (3), 267-275.
- Бхавна, Ахмад, Ф.Дж., Миттал, Дж. *et al.* (2009) Ингаляция сухого порошка нано-сальбутамола: новый подход к лечению бронхоконстриктивных состояний. *Европейский журнал фармацевтики и биофармацевтики*, 71(2), 282-291.
- Бисгаард Х., Анхой Дж., Клуг Б. и Берг Э. (1995) Неэлектростатический разделитель для аэрозоля Доставка. *Архивы болезней в детском возрасте*, 73(3), 226-230.

- Бисгаард Х., Клуг Б., Самби Б.С. и Бернелл П.К.П. (1998) Масса мелких частиц из Ингаляторы Diskus и Turbuhaler у детей с астмой. *Европейский респираторный журнал*, **11**(5), 1111- 1115. де Бур, А.Х., Гьялтема, Д., Хагедорн, П. и Фрайлинк, Х.В. (2002) Характеристика ингаляционных аэрозоли: критическая оценка каскадного анализа ударных частиц и метода лазерной дифракции. *Международный фармацевтический журнал*, **249**(1-2), 219-231. де Бур, А.Х., Хагедорн, П., Гьялтема, Д. *et al.* (2006) Технология воздушного классификатора (АСТ) при вдыхании сухого порошка: часть 3. Проектирование и разработка семейства воздушных классификаторов для Novolizer® многодозовый ингалятор с сухим порошком. *Международный фармацевтический журнал*, **310**(1 -2), 72 -80.
- Боскийон, С. (2010) Переносчики лекарств в легких - играют ли они роль в биофармацевтике-эффективность ингаляционных лекарств. *Журнал фармацевтических наук*, **99**(5), 2240 -2255.
- Brain, J.D. (1988) Макрофаги легких: сколько существует видов? Что они делают. *Амер-Обзор isan по респираторным заболеваниям*, **137**(3), 507 -509.
- Брамбилла Г., Гандертон Д., Гарзия Р. *et al.* (1999) Модуляция аэрозольных облаков образуется при вдыхании аэрозолей под давлением. *Международный фармацевтический журнал*, **186**(1), 53 - 61.
- Бранд П., Хауссингер К., Мейер Т. *et al.* (1999) Внутривегеточное распределение депонированных частиц. *Журнал аэрозольной медицины: Очистка от осаждения и эффекты в лунной системе*, **12**(4), 275-284.
- Бранд П., Хедерер Б., Остин Г. *et al.* (2008) Более высокое отложение в легких с помощью Респимата Ингалятор с мягким туманом, чем HFA-MDI, у пациентов с ХОБЛ с плохой техникой. *Международный журнал хронической обструктивной болезни легких*, **4**(4), 763- 770.
- Броклбанк Д., Рам Ф. и Райт Дж. (2000) Различия в технике использования ингалятора между устройства для ингаляций: систематический обзор. *Грудная клетка*, **55**, A63 -A63.
- Броди Т. и Адалат С. (2006) Односторонне фиксированный расширенный зрачок у здорового ребенка. *Архивы Болезнь в детском возрасте*, **91** (12), 961.
- Brodka-Pfeiffer, K., Langguth, P., Gra, P. and Häusler, H. (2003) Влияние механической активаци-на физическую стабильность сульфата сальбутамола. *Европейский журнал фармацевтики и биофармацевтики*, **56** (3), 393-400. Broeders, M.E.A.C., Molema, J., Нор, W.C.J. и Folgering, H.T.M. (2003) Специалисты по ингаляции-файлы у астматиков и пациентов с ХОБЛ: воспроизводимость и эффективность инструкции. *Журнал аэрозольной медицины*, **16** (2), 131 - 141. Бургель П.Р. (2011) Роль мелких дыхательных путей в обструктивных заболеваниях дыхательных путей. *Европейский Респираторный обзор: Официальный журнал Европейского респираторного общества*, **20** (119), 23 -33.
- Бернелл, П.К.П., Смолл, Т., Дойг, С. *et al.* (2001) Эффективность продукции Diskus Ex-vivo (ТМ) и ингаляторов Turbuhaler (ТМ) с использованием профилей ингаляции у пациентов с тяжелой хронической обструктивной болезнью легких. *Респираторная Медицина*, **95** (5), 324-330. Камениш Г., Альзенц Дж., ван де Уотербимд Х. и Фолкерс Г. (1998) Оценка проницаемости путем пассивной диффузии через монослои клеток Сасо-2 с использованием липофильности и молекулярной массы лекарств. *Европейский журнал фармацевтических наук*, **6**(4), 325-333.
- Карвалью, Т.К., Питерс, Дж.И. и Уильямс, Р.О. (2011) Влияние размера частиц на региональные отложение в легких - какие есть доказательства? *Международный фармацевтический журнал*, **406**(1 -2), 1- 10.

- Кэссиди, Дж.П., Амин, Н., Марино, М. *et al.* (2011) Отложение и клиренс инсулина в легких после-
lowing technosphere (A (R)) введения ингаляционного порошка инсулина. *Фармацевтические
Исследования*, **28**(9), 2157-2164. Cegla,
U.N.U. (2004) Характеристики давления и расхода при вдохе в ингаляторах с сухим порошком.
Респираторная Медицина, **98**(Дополнение 1), S22 - S28.
- Кериана, П., Навалези, П., Рампулла, С. *et al.* (2003) Использование бронхолитиков во время неинвазивной
механической вентиляции легких. *Архивы Monaldi по заболеваниям органов грудной клетки*, **59**(2), 123
- 127. Чавла А., Тейлор К.М.Г., Ньютон Дж.М. и Джонсон М.К.Р. (1994) Производство высушенного распылением
сульфата салбутамола для использования в составе сухого порошкового аэрозоля. *Международный журнал-
финал фармацевтики*, **108**(3), 233-240.
- Чиенг Н., Зуйович З., Боумейкер Г. (2006) Влияние условий измельчения на твердофазное превращение гидрохлорида ранитидина в форму 1. *Международный фармацевтический журнал. тасеутикс*, **327**(1-2), 36-44.
- Чихалия В., Форбс Р.Т., Стори Р.А. и Тайсхерст М. (2006) Влияние кристалла морфология и тип мельницы на беспорядок, вызванный измельчением кристаллов. *Европейский журнал фармацевтических наук*, **27**(1), 19-26.
- Чоу, А.Х.Л., Тонг, Х.Х.Ю., Чаттопадхьяй, П. и Шекунов, Б.Ю. (2007) Технология частиц-
наринг для доставки лекарств в легкие. *Фармацевтические исследования*, **24**(3), 411-437.
- Кларк А.Р., Чемберс К.Б., Мьюир Д. (2007) Эффект двухфазной ингаляции на профили осаждения и удаления крупных (6,5 мкм) болюсных аэрозолей. *Journal of Аэрозольная медицина: Очистка от отложений и эффекты в легких*, **20**(1), 75-82. Кларк, Д.Дж. и Липпорт, Б.Дж. (1996) Влияние многократных включений, замедленной ингаляции и антистатической обработки на биодоступность салбутамола в легких с помощью спейсерного устройства. *Грудная клетка*, **51**(10), 981 - 984.
- Купер, К.Б. (2006) Связь между хронической обструктивной болезнью легких и симптомами-
ТОС и гиперинфляция и их влияние на физические нагрузки и функции организма. *Американский журнал медицины*, **119**, S21-S31.
- Купер А., Поттер Т. и Люкер Т. (2010) Прогнозирование эффективных доз при вдыхании в легкие с помощью моделей количественной взаимосвязи структуры и активности задержки в легких in silico и скринингов эффективности in vitro. *Метаболизм и распределение лекарственных средств*, **38** (12), 2218-2225.
- Корриган, К.Дж., Леви, М.Л., Декхейзен, П.Р. *et al.* (2009) Серия ADMIT - проблемы в области ингаляционной терапии. 3) Легкая персистирующая астма: обоснование терапии ингаляционными кортикостероидами. *Респираторный журнал первичной медицинской помощи: журнал группы дыхательных путей общей практики*, **18**(3), 148-158.
- Крэмpton М., Киннерсли Р. и Айрес Дж. (2004) Получение субмикрометровых частиц методом дозированных ингаляторов под давлением. *Журнал аэрозольной медицины*, **17**(1), 33-42.
- Кромптон Г. (2006) Краткая история ингаляционной терапии астмы за последние пятьдесят лет. *Респираторный журнал первичной медицинской помощи: Журнал группы General Practice Airways Group*, **15**(6), 326-331.
- Кросленд Б.М., Джонсон М.Р. и Матида Э.А. (2009) Характеристика аэрозоля скорости в дозированном ингаляторе под давлением. *Журнал аэрозольной медицины и доставки лекарств в легкие*, **22**(2), 1-13. Д'Аддио, С.М. и Прудомм, Р.К. (2011) Контроль образования наночастиц лекарственных средств путем быстрого осаждения. *Обзоры усовершенствованной доставки лекарственных средств*, **63**(6), 417-426.
- Долби Р. и Суман Дж. (2003) Ингаляционная терапия: технологические вехи в лечении астмы. *Обзоры усовершенствованной доставки лекарств*, **55**(7), 779-791.

- Дэвис, Дж.К., Элтон, Э.В. и Буш, А. (2007) Муковисцидоз. *Британский Медицинский журнал*, **335**(7632), 1255-1259.
- Дэвис, М., Бриндли, А., Чен, Х.У. *et al* (2005) Характеристика поверхности частиц лекарственного средства энергетика и модуль Юнга с помощью атомно-силовой микроскопии и обратной газовой хроматографии. *Фармацевтические исследования*, **22**(7), 1158 - 1166.
- Дэвис, Дж.К., Дэвис Г., Гилл Д. *et al*. (2011) Безопасность и экспрессия однократной дозы липидопосредованная генная терапия сftg верхних и нижних дыхательных путей у пациентов с МВ. *Детская пульмонология*, **281**, 8755 - 6863. Денкер Б.М. и Нигам С.К. (1998) Молекулярная структура и сборка плотного соединения-
Американский журнал физиологии: Физиология почек, **274**(1), F1 - F9.
- Дешпанде Д., Бланшар Дж., Шринивасан С. *et al* . (2002) Распыление липоплексов с использованием Система доставки в легкие AERx (R). *AAPS PharmSci* , **4**(3), 271-278.
- Данд, р. и Sohal, Х. (2008) легочной системы доставки лекарств для ингаляционной терапии в механически вентилируемых пациентов. *Экспертный обзор медицинских устройств* , **5**(1), 9- 18.
- Дикхофф, Б.Х.Дж., де Бур, А.Х., Ламбрегтс, Д. и Фрайлинк, Х.В. (2003) Влияние поверхностные и объемные свойства носителя при отделении частиц лекарственного средства от кристаллических лактозы- тозных частиц носителя во время ингаляции в зависимости от полезной нагрузки носителя и времени перемешивания. *Европейский журнал фармацевтики и биофармацевтики* , **56**(2), 291 - 302. Доннелли, Л.Э. и Роджерс, Д.Ф. (2008) Новые мишени и лекарственные средства при воспалительных заболеваниях легких-
Современное мнение в фармакологии , **8**(3), 219 -221.
- Дубус, Дж.К. и Долович, М. (2000) Вводимые дозы сальбутамола, дозированные под давлением.-
дозовый ингалятор из пяти различных пластиковых спейсеров. *Фундаментальная и клиническая фармакология* . , **14** (3), 219-224. Дудду, С.П., Сиск, С.А., Уолтер, Ю.Х. *et al* (2002) Улучшенная доставка в легкие за счет пассивного сухого порошковый ингалятор с использованием разработанного порошка PulmoSphere. *Фармацевтические исследования*, **19**, 689 -695.
- Данбар, К.А. (1997) Механизмы распыления дозированного ингалятора под давлением.
Наука и технология о твердых частицах, **15**(3 - 4), 253-271.
- Данбар, К.А. и Миллер, Дж.Ф. (1997) Применение методов лазерной диагностики для характеристики струи, выпускаемой из rMDI. *Международный журнал механики жидкости Исследования*, **24** (4-6), 568 - 577. Данбар, К.А., Уоткинс, А.П. и Миллер, Дж. Ф. (1997а) Экспериментальное исследование аэрозоль, выпущенный из rMDI с использованием методов лазерной диагностики. *Журнал аэрозольной медицины: очистка от отложений и эффекты в легких* . , **10** (4), 351-368. Данбар, К.А., Уоткинс, А.П. и Миллер, Дж. Ф. (1997b) Теоретическое исследование распыления из дозированного ингалятора под давлением. *Распыление и аэрозоли*, (4), 417-436. 7
- Эдвардс, Д.А. (2002) Доставка биологических агентов аэрозолями. *Журнал Айше.*, **48** (1), 2-6.
- Эдвардс, Д.А. и Данбар, С. (2002) Биоинженерия терапевтических аэрозолей. *Ежегодный Обзор Биомедицинской инженерии*, **4**, 93 -107.
- Эламин, А.А., Алнек, К., Олдерборн, Г. и Нистром, К. (1994) Повышенная метастабильность растворимость измельченного гризеофульвина в зависимости от образования неупорядоченной структуры поверхности. *Международный фармацевтический журнал*, **111**(2), 159-170. Эшенбахер В.Л., Буши Х.А. и Шенпард Д. (1984) Изменение осмолярности вдыхаемые аэрозоли вызывают бронхоспазм и кашель, но отсутствие проникающего аниона вызывает только кашель. *Американский обзор респираторных заболеваний.*, **129**(2), 211 - 215.

- Феррон, А. Г. (1994) свойства аэрозолей и осаждения в легких. *Европейское Респираторное Журнал*, 7(8), 1392- 1394.
- Флум, П.А., О'Салливан, Б.П., Робинсон, К.А. *et al.* (2007) Муковисцидоз легких
рекомендации - Хронические лекарственные препараты для поддержания здоровья легких. *Американский журнал респираторной медицины и реаниматологии*, **176** 957- 969.
- Форбс Б. (2000) Линии эпителиальных клеток дыхательных путей человека для исследований транспорта лекарств и метаболизма in vitro
Фармацевтическая наука и технологии сегодня, **3**(1), 18 - 27.
- Forbes, Б. и Эрхардт, С. (2005) Культура клеток респираторного эпителия человека для производства лекарств- практическое применение. *Европейский журнал фармацевтики и биофармацевтики*, **60**(2), 193 -205.
- Фостер, Н., Маммукари, Р., Дехгани, Ф. *et al.* (2003) Обрабатывающий фармацевтический ком-
фунтов стерлингов с использованием технологии плотного газа. *Исследования в области промышленной и инженерной химии*, **42**(25), 6476-6493.
- Фриджлинка Х.В. и ДеБоер А.Х. (2004) Ингаляторы с сухим порошком для доставки в легкие. *Мнение эксперта Системы-носители лекарственных средств*, **1**(1), 67 - 86.
- Фукунака Т., Савагучи К., Гольман Б. и Синохара К. (2005) Влияние формы частиц
из активных фармацевтических ингредиентов, полученных методом струйного измельчения в псевдооживленном красном растворе на когезионной основе. *Журнал фармацевтических наук*, **94** (5), 1004-1012.
- Гейсфорд С., Деннисон М., Тауфик М. и Джонс М.Д. (2010) После механического
активация сульфата сальбутамола при измельчении шариками с помощью изотермической калориметрии. *Международный национальный фармацевтический журнал*, **393**(1 - 2), 75- 79.
- Гартлехнер Г., Хансен Р.А., Карсон С.С. и Лор К.Н. (2006) Эффективность и безопасность
ингаляционные кортикостероиды у пациентов с ХОБЛ: систематический обзор и метаанализ
результатов для здоровья. *Анналы семейной медицины*, **4**(3), 253 - 262.
- Геллер Д.Э., Вирс Дж. и Хойердинг С. (2011) Разработка вдыхаемого сухого порошка
получение тобрамицина с использованием технологии PulmoSphere (TM). *Журнал аэрозольной медицины и доставки лекарств в легкие*, **24**(4), 175-182.
- Газанфари Т., Элхиси А.М.А., Динг З. и Тейлор К.М.Г. (2007) Влияние жидкости
физико-химические свойства при распылении с помощью вибросетки. *Международный журнал фармацевтики*, **339**(1-2), 103 -111.
- GINA (Глобальная инициатива по борьбе с астмой) (2011) Глобальная стратегия лечения астмы и
Профилактика, доступная из <http://www.ginasthma.org/GINA-Report>
,-Глобальная-стратегия- ведения-и-профилактики-астмы (последнее обращение 14 августа 2013 г.). Гонда,
И. (1985) Разработка систематической теории суспензионных ингаляционных аэрозолей. I.
Основа для изучения влияния агрегации на аэродинамическое поведение частиц
лекарственного средства . *Международный фармацевтический журнал*, **27**(1), 99- 116.
- Гонда И. (1996) Ингаляционная терапия рекомбинантной дезоксирибонуклеазой человека I.
Обзоры усовершенствованной доставки лекарств, **1**(1), 1 -110.
- Griesenbach, U. и Alton, E.W.F.W. (2009) Перенос гена в легкие: извлеченные уроки
из более чем двух десятилетий генной терапии CF. *Обзоры усовершенствованной доставки лекарств*, **61**(2), 128 - 139.
- Гризенбах У., Маклахлан Г., Колли Д. *et al.* (2011) Токсикологические исследования в поддержку
многодозовое клиническое исследование британского консорциума генной терапии cf. *Детская пульмонология*, **46**, 298- 298.

- Хахим К. и Гонда И. (1988) Разработка систематической теории суспензии аэрозоли для вдыхания. II. Агрегаты монодисперсных частиц, распыленных в полидисперсные капли. *Международный фармацевтический журнал*, **41**(1 - 2), 147- 157. Холл Г.Л., Эннезе Т., Лоой К. и Девадасон С.Г. (2011) Использование спейсеров в респираторных лабораториях и доставляемая доза салбутамола в спейсерах, доступных в Австралии и Новой Зеландии. *Респирология*, **16**(4), 639-644. Ханания, Н.А. и Донохью, Дж.Ф. (2007) Фармакологические вмешательства при хронической обструктивной-хронические заболевания легких: бронхитики. *Труды Американского торакального общества*, **4**(7), 526-534.
- Хесс Д.Р. (2008) Устройства для доставки аэрозоля при лечении астмы. *Респираторная помощь*, **53**(6).
- Хейдер, Дж. (2004) Отложение вдыхаемых частиц в дыхательных путях человека и последствия- влияние на региональное нацеливание при доставке лекарств от респираторных заболеваний. *Труды Американского торакального общества*, **1**(4), 315 -320.
- Heyder, J., Gebhart, J., Rudolf, G. *et al* (1986) Отложение частиц в дыхании человека.- торный тракт размером от 0,005 до15 мкм. *Научный журнал по аэрозолям*, **17**(5), 811-825.
- Хиллер, Ф.К. (1991) Последствия роста гигроскопических частиц для здоровья человека дыхательные пути. *Журнал аэрозольной медицины: очистка от отложений и эффекты в легких*, **4**(1), 1-23. Хиндл М. и Байрон П. Р. (1995) Дозируют выбросы от продаваемых ингаляторов с сухим порошком. *Международный фармацевтический журнал*, **116**(2), 169-177.
- Херст, П.Х., Бэкон, Р.Э., Питкэрн, Г. Р. *et al*. (2001) Сравнение отложения в легких будесонид от Easyhaler[®], Турбухалер[®] и рMDI плюс спейсер у пациентов с астмой. *Респираторная Медицина*, **95** (9), 720- 727.
- Hochrainer, D., Holz, H., Kreher, C. *et al*. (2005) Сравнение скорости аэрозоля и продолжительность распыления Respimat[®] Ингалятор Soft Mist[™] и дозированные ингаляторы под давлением. *Журнал аэрозольной медицины: очистка от отложений и эффекты в легких*, **18** (3), 273-282. Хогг, Дж.К. (2004) Патология ограничения воздушного потока при хронической обструктивной болезни легких заболевание. *Ланцет*, **364**(9435), 709 - 721.
- Хонг, Дж.Н., Хиндл, М. и Байрон, П.Р. (2002) Контроль размера частиц путем коагуляции. о новых конденсирующихся аэрозолях в резервуарных камерах. *Журнал аэрозольной медицины: Очистка от отложений и эффекты в легких*, **15** (4), 359 - 368. Хойе, Дж.А., Гупта, А. и Мюрдал, П.Б. (2008) Растворимость твердых растворенных веществ в HFA-134a с корреляцией с физико-химическими свойствами. *Журнал фармацевтических наук*, **97**(1), 198 - 208. Ирнгартингер, М., Камулья, В., Дамм, М. *et al*. (2004) Доставка терапевтических пептидов в легкие вдыхание сухого порошка: последствия микронизации и производства. *Европейский журнал фармацевтики и биофармацевтики*, **58** (1), 7-14. Ислам, Н., Стюарт, П., Ларсон, И. и Хартли, П. (2004a) Влияние размера носителя на дис-получение сальметерола ксинафоата из интерактивных смесей. *Журнал фармацевтических наук*, **93**(4), 1030-1038. Ислам, Н., Стюарт, П., Ларсон, И. и Хартли, П. (2004b) Модификация поверхности лактозы путем декантации: является ли соотношение мелкодисперсной лактозы с лекарственным средством ключом к лучшему диспергированию сальме- ксинафоата терола из смесей, взаимодействующих с лактозой? *Фармацевтические исследования*, **21**(3), 492- 499.

- Ислам, Н., Стюарт, П., Ларсон, И. и Хартли, П. (2005) Влияние шероховатости поверхности к распределению силы адгезии сальметерола ксинафоата на лактозных носителях методом атомно-силовой микроскопии. *Журнал фармацевтических наук.*, **94**(7), 1500-1511. Джефферс, Д.Э. (2005) Относительные величины воздействия электростатического изображения и термофоретических сил на частицы в дыхательных путях.- морфоретические силы на частицы в дыхательных путях. *Дозиметрия радиационной защиты*, **113**(2), 189-194. Джефферс
- Д. (2007) Моделирование и анализ не подтверждают гипотезу о том, что взимание платы с помощью корона от линии электропередачи увеличивает осаждение частиц в легких, находящихся в воздухе. *Радиационная защита Дозиметрия*, **123** (2), 257-261.
- Джонс, М.Д. и Прайс, Р. (2006) Влияние мелких частиц наполнителя на производительность- производство сухих порошковых ингаляционных составов на основе носителя. **23**(8), 1665 - 1674. *Фармацевтические исследования*
- Джоши В., Диведи С. и Уорд Г.Х. (2002) Увеличение удельной поверхности будесонида-онид при хранении после микронизации. *Фармацевтические исследования.*, **19**(1), 7- 12.
- Kamin, W.E.S., Genz, T., Roeder, S. *et al.* (2002) Массовый выход и распределение частиц по размерам количество глюкокортикостероидов, выделяемых различными ингаляционными устройствами, в зависимости от различных параметров вдоха. *Журнал аэрозольной медицины: очистка от отложений и эффекты в легких.*, **15**(1), 65 -73. Келлер, М. (1999) Инновации и перспективы дозированных ингаляторов в области легочных лекарств
- Доставка. *Международный фармацевтический журнал*, **186**(1), 81-90.
- Kleinstreuer, С. Чжан, З. и Донохью, Дж. Ф. (2008) таргетный препарат-аэрозоль доставка в дыхательная система человека. *Ежегодный обзор биомедицинской инженерии*, **10**, 195 - 220. Кунка, Р., Эндрюс, С., Пимаццони, М. *et al*(2000) Пропорциональность дозы флутиказона- один пропionato из гидрофторалкановых дозированных ингаляторов под давлением (PMDI) и сопоставимость с хлорфторуглеродными PMDI. *Респираторная медицина.*, **94**, S10-S16.
- Квок, П.К.Л. и Чан, Х.-К. (2009) Электростатика фармацевтических ингаляционных аэрозолей. *Журнал фармации и фармакологии.*, **61**(12), 1587-1599.
- Ларриб Х., Мартин Г.П., Марриотт К. и Прайм Д. (2003а) Влияние носителей и морфология лекарственных средств при доставке лекарственных средств из сухих порошкообразных составов. *Международный журнал фармацевтики.*, **257**(1 -2), 283-296.
- Ларриб Х., Мартин Г.П., Прайм Д. и Марриотт С. (2003b) Характеристика и исследования осаждения искусственных кристаллов лактозы с возможностью использования в качестве носителя для распыления сульфата салбутамола из сухих порошковых ингаляторов. *Европейский журнал фармацевтических наук.*, **19**(4), 211-221. Лич,
- С.Л. (1998) Улучшенная доставка ингаляционных стероидов в крупные и мелкие дыхательные пути. *Респираторная медицина.*, **92**, 3-8.
- Лич, К.Л., Дэвидсон, П.Дж., Хассельквист, Б.Э. и Будро, Р.Дж. (2005) Влияние размера частицы- и техники дозирования пациенту на отложение HFA-беклометазона в легких из дозированного ингалятора. *Журнал аэрозольной медицины: Очистка от отложений и эффекты в легких*, **18** (4), 379- 385. Le Brun, P.P.H., de Boer, A.H., Gjaltema, D. *et al.* (1999) Ингаляция тобрамицина при цистик-фиброз - Часть 1: выбор небулайзера. *Международный фармацевтический журнал.*, **189**(2), 205 - 214.
- Ле Брюн, П.П.Х., де Бур, А.Х., Хейерман, Х.Г.М. и Фрайлинк, Х.В. (2000) Обзор технических аспектов распыления лекарственных средств. *Фармацевтический мир и наука*, **22**(3), 75-81.

- Леверша А.М., Кампанелла С.Г., Эйкин Р.П. и Ашер М.И. (2000) Затраты и эффективность спейсера по сравнению с небулайзером у маленьких детей с умеренной и тяжелой острой астмой. *Журнал педиатрии*, **136**(4), 497- 502. Li, L.L., Mathias, N.R., Heran, C.L. *et al.* (2006) Карбопол-опосредованный парацеллюлярный транс-расширение портов в клеточных слоях Calu-3. *Журнал фармацевтических наук*, **95** (2), 326- 335.
- Li, H.Y. и Seville, P.C. (2010) Новые составы pMDI для доставки лекарств в легкие- *Международный фармацевтический журнал*, **385**, 73- 78.
- Лонгест, П.В., Маклески, Дж. Т. Младший и Хиндл, М. (2010) Характеристика наноаэрозоля изменение размера при усиленном конденсационном росте. *Наука и технология в области аэрозолей*, **44**(6), 473-483. Лу, К., Ян, Дж., Лю, З. *et al.* и Исследовательская группа по небулизированным антибиотикам (2011) исследовали небулизацией цефтазидим и амикацин при ИВЛ-ассоциированной пневмонии, вызванной *pseudomonas aeruginosa*. *Американский журнал респираторной медицины и реаниматологии*, **184**(1), 106-115.
- Лукас П., Андерсон К. и Станифорт Дж.Н. (1998) Отложение белка из сухого порошка ингаляторы: мультиплеты с мелкими частицами в качестве модификаторов эффективности. *Фармацевтические исследования*, **15**(4), 562-569.
- Манфорд Ф., Тронде А., Йеппссон А.Б. *et al.* (2005) Проницаемость лекарственного средства в 16HBE14o-слои клеток дыхательных путей коррелируют с абсорбцией из изолированного перфузированного легкого крысы. *Европейский журнал фармацевтических наук*, **26**(5), 414-420.
- Мартонен Т.Б. (1993) Математическая модель селективного осаждения вдыхаемых фармацевтических препаратов-мацевтиков. *Журнал фармацевтических наук*, **82**(12), 1191-1199.
- Мартонен Т.Б. и Кац И. (1993) Закономерности осаждения полидисперсных аэрозолей в легких человека. *Журнал аэрозольной медицины: Очистка от отложений и эффекты в легких*, **6**(4), 251-274. Мастрандреа Л.Д. и Кваттрин Т. (2006) Клиническая оценка ингаляционного инсулина. *Дополнительно Отзывы О Доставке Лекарств*, **58**(9 -10), 1061 - 1075.
- Матиас, Н.Р., Тимошик, Дж., Стецько, П.И. *et al.* (2002) Характеристики проницаемости Calu-3 клетки бронхиального эпителия человека: корреляция *in vitro* и *in vivo* для прогнозирования всасывания в легких у крыс. *Журнал нацеливания на лекарственные средства*, **10**(1), 31-40. Матиас, Н.Р., Ямасита, Ф. и Ли, В.Х.Л. (1996) Культура клеток респираторного эпителия модели для оценки транспорта ионов и лекарственных средств. *Расширенные Обзоры Доставки Лекарств*, **22**(1- 2), 215 -249.
- Мацукава, Ю., Ли, В.Х., Крэндалл, Э.Д. и Ким, К.Дж. (1997) Зависящий от размера декстран транспорт через монослой клеток альвеолярного эпителия крысы. *Журнал фармацевтических наук- еnces*, **86**(3), 30-309. Мехендейл Х.М., Анжевин Л.С. и Омия Ю. (1981) Изолированное перфузированное легкое - а критическая оценка. *Токсикология*, **21** (1), 1 -36.
- Майкл, Ю., Чоудхри, Б.З., Эшерст, И.К. *et al.* (2000) Физико-химические свойства салметерола и флутиказона пропионата в различных средах растворителей. *Международный фармацевтический журнал*, **200**(2), 279-288. Миду, Н., Хосек, П., Пайерес, Л. и Ауцелин, Дж.Р. (1999) Микронизация фармацевтических препаратов-полезные вещества в спирально-струйной мельнице. *Порошковая технология*, **104**(2), 113 -120.

Митчелл Дж., Бауэр Р., Ляпустина С. *et al.* (2011) Методы определения размера, не основанные на воздействии, аэрозоли, выделяемые при пероральном вдыхании и назальных лекарственных средствах (OINDPs). *AAP PharmSciTech*, 12(3), 965-988.

Митчелл, Дж.П., Копполо, Д.П. и Нагель, М.В. (2007) Электростатика и ингаляционная медицина-

возможности: влияние на доставку с помощью дозированных ингаляторов под давлением и дополнительных устройств. *Респираторная помощь*, 52(3), 283-300. Митчелл

Дж.П., Нагель М.В., Николс С. и Нербринк О. (2006) Лазерная дифрактометрия как

методика быстрой оценки размера частиц аэрозоля из ингаляторов. *Журнал Аэрозольная медицина: очистка от отложений и эффекты в легких.*, 19(4), 409-433. Миттик,

Л.Л., ван Италли, К.М. и Андерсон, Дж.М. (2000) Молекулярная физиология и патогенез.-

физиология плотных соединений - I. Структура и функция плотных соединений:

уроки мутантных животных и белков. *Американский журнал физиологии: Желудочно-кишечный тракт и физиология печени.*, 279(2), G250 - G254. Мицаку

С., Хелмис С. и Хусиадас С. (2005) Эйлерово моделирование отложений в легких

с секционным представлением

Научный журнал по аэрозолям, 36(1),

динамики аэрозоля. 75-94.

Мурнайн Д., Мартин Г.П. и Марриотт С. (2008a) Разработка экологически безопасного способа

получения микрочастиц: амфифильная кристаллизация. *Европейский журнал фармацевтики и биофармацевтики*, 69(1), 72-82.

Мурнайн Д., Мартин Г.П. и Марриотт С. (2008b) Исследования формулировки

дозированные ингаляторы микрокристаллов салметерола ксинафоата и флутиказона пропионата.

Фармацевтические исследования, 25 (10), 2283 - 2291. Наир, А., Клири, К.,

Мензис, Д. *et al.* (2009) Новый интегрированный вихрь, приводимый в действие дыханием

спейсерное устройство увеличивает относительную биодоступность флутиказона/ салметерола в легких при комбинированном применении. *Фармакология и терапия легких.*, 22 (4), 305-310. Национальный сотрудничающий центр по хроническим заболеваниям (2004), ведущий лечение стабильной ХОБЛ.

Грудная клетка, дополнение 1), 139-130.

Ньюман, С.П., Браун, Дж., Стил, К.П. *et al.* (1998) Отложение фенотерола в легких и грипп-

nisolide доставляется с помощью нового прибора для ингаляции лекарственных средств -

сравнение РЕСПИ-коврик с обычных дозированных ингаляторов с и без распорных устройств. *Грудь*, 113(4), 957 - 963.

Ньюман, С. П. и Чан, Х.-К. (2008) Сравнение легочных препаратов In vitro / in vivo

Доставка. *Журнал аэрозольной медицины и доставки лекарств в легкие.*

21(1), 77 -84.

Ньюман С. и Джи-Тернер А. (2005) Технология вибрирующих сеток Omron MicroAir-

небулайзер огу, подход 21 века к ингаляционной терапии. *Журнал терапевтических исследований.*, (4), 39-33. Ньюман С.П. и Ньюхаус М.Т. (1996)

Эффект дополнительных устройств для аэрозольной доставки лекарств.-

ету: исследования осаждения и клинические аспекты. *Журнал аэрозольной*

медицины: Осаждение Клиренс и эффекты в легких., 1(1), 55-70. Никандер К.,

Денайер Дж., Смит Н. и Воллмер П. (2001) Особенности дыхания и аэрозоль

доставка: влияние обычных моделей поведения человека, а также синусоидальных и прямоугольных

сигналов на скорость доставки. *Журнал аэрозольной медицины: Очистка от отложений и эффекты в легких.*, 14(3), 327-333.

Никандер К., Турпейнен М. и Воллмер П. (1999) Обычный ультразвуковой распылитель

доказана неэффективность распыления суспензии. *Журнал аэрозольной*

медицины: осаждение Клиренс и эффекты в легких., 12(2), 47 -53.

- Ноукс, Т. (2002) Медицинские аэрозольные пропелленты. *Журнал химии фтора*, **118**(1-2), 35 - 45.
- О'Каллаган, К., Линч, Дж., Кант, М. и Робертсон, К. (1993) Улучшение содержания натрия подача кромогликата из спейсерного устройства с использованием антистатической прокладки, немедленная ингаляция и предотвращение многократного введения препарата. *Грудная клетка*, **48**(6), 603-606.
- О'Доннелл, Д.Э., Лам, М. и Уэбб, К.А. (1999) Спирометрические корреляции улучшения-улучшение физической работоспособности после антихолинергической терапии. *Американский журнал респираторной медицины и реаниматологии*, **160**(2), 542- 549.
- О'Лири, М., Балачандран, У., Рогед, П. и Чемберс, Ф. (2008) Биполярный характер заряд задерживается на предположительно *Физический журнал: Серия конференций*, **1422**, 012022.
- О'Шонесси, П.Т. и Раабе, О.Г. (2003) Сравнение данных о каскадных ударных элементах методы сокращения. *Наука и технология в области аэрозолей*, **37**(2), 187 - 200.
- Оверстейген, Л. (2008) Ингаляционные лекарственные средства: дифференциация продукции по устройству. *Innovation в фармацевтической технологии*, **26**, 62 - 65.
- Паттерсон, Дж.Э., Джеймс, М.Б., Форстер, А.Х. *et al.* (2005) Влияние тепловых и механические методы получения аморфного состояния четырех малорастворимых соединений. *Журнал фармацевтических наук*, **94** (9), 1998-2012.
- Паттон, Дж.С. (1996) Механизмы поглощения макромолекул легкими. *Усовершенствованный препарат. Обзоры доставки*, **19**(1), 3-36.
- Паттон, Дж.С., Букар, Дж.Дж. и Эдлон, М.А. (2004) Клиническая фармакокинетика и фармацевтика-динамика ингаляционного инсулина. *Фармакокинетика Clin*, **43**(12), 781- 801.
- Паттон, Дж.С., Фишберн, К.С. и Вирс, Дж.Г. (2004) Легкие как портал входа для системных-своевременная доставка лекарств. *Труды Американского торакального общества*, (4), 338 -344.
- Паувелс Р., Ньюман С. и Боргстрем Л. (1997) Отложение в дыхательных путях и эффекты на дыхательные пути противоастматических препаратов, доставляемых из дозированных ингаляторов. *Европейский респираторный журнал*, **10**(9), 2127-2138.
- Пегуин, Р.О.П.С. и да Роша, С. Р.П. (2008) Взаимодействия растворитель-растворенное вещество во фтористом водороде-пропелленты на роалкане. *Журнал физической химии В*, **112**(27), 8084 -8094.
- Перкинс, М.К., Банкер, М., Джеймс, Дж. *et al.* (2009) К пониманию и прогнозированию-изменений материала при микронизации с использованием атомно-силовой микроскопии. *Европейский журнал фармацевтических наук*, **38** (1), 1-8.
- Пейрон, И.Д., Бритто, И.Л., Бениссан, Л.Б. и Тардье, Б.З. (2005) Разработка и пер.-разработка нового дозированного ингалятора (MDI) на основе гидрофторалкана (HFA 134a) сальметерола. *Респираторное лекарство*, **38**(C20), C30.
- Вильдхабер Дж.Х., Вранкен И. *et al.* (1999) Мытье пластиковых прокладок в быту моющее средство снижает электростатический заряд и значительно улучшает доставку. *Европейский респираторный журнал*, **13** (3), 673-678.
- Прайс Р. и Янг П.М. (2004) Визуализация кристаллизации лактозы из аморфного состояния. *Журнал фармацевтических наук*, **93**(1), 155-164.
- Прайс Р., Янг П.М., Эдж С. и Станифорт Дж.Н. (2002) Влияние относительной влажности-исследование взаимодействия частиц в составах сухих порошковых ингаляторов на основе носителей. *Международный национальный фармацевтический журнал*, **246**(1-2), 47-59.
- Пritchard, Дж.Н. (2001) Влияние отложения в легких на клинический ответ. *Журнал Аэрозольная медицина*, **14**(Дополнение 1), S19 - S26.

- Прайор, Дж.А. (1999) Физиотерапия для очистки дыхательных путей у взрослых. *Европейский респираторный Журнал*, **14**(6), 1418-1424.
- Рейв, К., Ботт, С., Хайнеманн, Л. *et al* (2005) Временной профиль действия ингаляционного инсулина при сравнение с подкожно вводимым инсулином лизпро и обычным человеческим инсулином. *Dia-рекомендации по уходу*, **28**(5), 1077-1082. Рехман М., Шекунов Б.Ю., Йорк П. *et al* (2004) Оптимизация порошков для лечения легочных заболеваний. доставка с использованием технологии сверхкритических жидкостей. *Европейский журнал фармацевтических наук*, **22**(1), 1-17. Рессмейер А.Р., Ларссон А.К., Фоллмер Э. *et al*. (2006) Характеристика морской свинки высокоточные срезы легких: сравнение с тканями человека. *Европейский респираторный журнал- заключительный*, **28**(3), 603-611. Ревершон Э. (1999) Сверхкритическое осаждение микро- и наночастиц противорастворителем. *Журнал сверхкритических жидкостей*, **15**(1), 1 - 21.
- Росс Д.Л. и Габрио Б.Дж. (1999) Достижения в технологии дозированных ингаляторов благодаря разработке системы доставки лекарств, не содержащей хлорфторуглеродов. *Журнал аэрозольной медицины: Очистка от отложений и эффекты в легких*, **12** (3), 151 - 160.
- Ростами, А.А. (2009) Компьютерное моделирование осаждения аэрозоля в дыхательных путях: areview. *Ингаляционная Токсикология*, **21**(4), 262 -290.
- Poy, C. M., Мельник с. и Sorscher, E. Ю. (2005) кистозный фиброз. *Журнале Новой Англии Медицина*, **352**(19), 1992 - 2001.
- Рюкрофт, Г., Хипкисс, Д., Ли, Т. *et al*. (2005) Сонокристаллизация: использование ультразвука для улучшенной промышленной кристаллизации. *Исследования и разработки в области органических процессов*, **9**(6), 923-932.
- Сакагами, М. (2006) Модели in vivo, in vitro и ex vivo для оценки легочного всасывания и распределение ингаляционных терапевтических средств для системной доставки. *Расширенная доставка лекарств Обзоры*, **58**(9 -10), 1030- 1060.
- Сакагами М., Сакон К., Киношита В. и Макино Ю. (2001) Улучшенная абсорбция в легких после аэрозольного введения мукоадгезивных порошковых микросфер. *Журнал контролируемого высвобождения*, **77**(1 -2), 117- 129. Салим И., Смит Х. и Телко М. (2008) Прогнозирование состава сухого порошкового ингалятора эффективность благодаря поверхностной энергетике и динамике смешивания. *Разработка лекарств и промышленная фармацевтика*, **34**(9), 1002 -1010. Сандерс, М. (2007) ингаляционная терапия: исторический комментарий. *Первичная Респираторная Поддержка Журнал*, **16**(2), 71 -81.
- Сангван С., Кондос Р. и Смолдоне Г.К. (2003) Отложение в легких и вдыхаемая масса при влажном распылении. *Журнал аэрозольной медицины: Очистка от отложений и эффекты в легких*, **16**(4), 379-386. Сатир П. и Сани М.А. (1990) Физиология ресничек и мукоцилиарных взаимодействий. *Ежегодный обзор физиологии*, **52**, 137 -155.
- Шейх Г., Кольхефль М.Дж., Бранд П. и Сикмелер Р. (2006) Клинические перспективы системной и макромолекулярной доставки в легкие. *Расширенные обзоры доставки лекарств*, **58**(9 -10), 996 -1008.
- Scheuch, G., Kohlhaeuf, M., Moeller, W. *et al*. (2008) Выведение частиц из дыхательных путей у субъектов с гиперреактивностью бронхов и хронической обструктивной болезнью легких . *Экспериментальное исследование легких*, **34**(9), 531- 549.

- Скьявоне, Х., Палакодати, С., Кларк, А. *et al.* (2004) Оценка разработанного SCF. смеси лактозы на основе частиц в пассивных ингаляторах с сухим порошком. *Международный журнал фармацевтики.*, **281**(1 - 2), 55 - 66.
- Шуберт Х. (1981) Принципы агломерации. *Международная химическая инженерия*, **21**(3), 363 - 377.
- Шульц А., Ле Суеф Т.Дж., Вентер А. . (2010) Вдыхание аэрозоля из спейсеров иет *al* для детей с клапанными задерживающими камерами требуется несколько глубоких вдохов. *Педиатрия*, **126**(6), E1493 - E1498.
- Schwarze, P.E., Ovrevik, J., Lag, M. *et al.* (2006) Свойства твердых частиц и здоровье человека воздействие: согласованность эпидемиологических и токсикологических исследований. *Токсикология для человека и экспериментов.* , **25**(10), 559-579.
- Шекунов Б.Ю. и Йорк П. (2000) Процессы кристаллизации в фармацевтической технологии и проектирование доставки лекарств. *Журнал роста кристаллов*, **211**(1- 4), 122 -136.
- Смальдоне, Г.К. (2002) "Умные" небулайзеры. *Респираторная терапия*, **47**(12), 1434-1441.
- Смальдоне, Г.К. (2006) Достижения в области аэрозолей: респираторные заболевания взрослых. *Журнал по аэрозолям. Медицина: очистка от отложений и эффекты в легких.*, **19**(1), 36 - 46.
- Смит, Х.Д.К. (2003) Влияние переменных состава на эффективность альтернативные дозированные ингаляторы с пропеллентным приводом. *Обзоры усовершенствованной доставки лекарств* **55**(7), 807 - 828.
- Смит, Х., Хики, А.Дж., Брейс, Дж. *et al.* (2006) Анализ структуры распыления для дозированных ингаляторов I: корреляции размера отверстия, размера частиц и движения капель. *Разработка лекарств и промышленная фармацевтика*, **32**(9), 1033- 1041.
- Дж.Л., Хоралкова Л. и Эрхардт С. (2008) Модели клеточных культур In vitro для оценка распределения препарата в легких. *Заключение эксперта о метаболизме препарата и токсикологии*, **4**(4), 333 - 345.
- Шричана Т., Мартин Г.П. и Марриотт С. (1998) Ингаляторы с сухим порошком: влияние устойчивость устройства и порошковой композиции к отложению лекарственных средств и лактозы in vitro. *Европейский журнал фармацевтических наук.*, (1), 73-80. **7**
- Штальхофен В. (1980) Экспериментальное определение регионального осаждения аэрозоля- частицы в дыхательных путях человека. *Журнал Американской Ассоциации промышленной гигиены- заключительный*, **41**(6), 385-398.
- Штейн С.В. и Мюрдал П.Б. (2004) Теоретический и экспериментальный анализ рецептуры параметры устройства, влияющие на распределение раствора MD1 по размерам. *Фармацевтический журнал- ceutical Sciences*, **93**(8), 2158-2175.
- Штейн С.В. и Мюрдал П.Б. (2006) Относительное влияние распыления и испарения- влияние эффективности доставки лекарств с помощью дозированного ингалятора. *Наука и технология в области аэрозолей.*, **40**(5), 335 - 347.
- Стрессманн, Ф.А., Роджерс, Г.Б., Клем, Э.Р. *et al.* (2011) Анализ бактериального сообщества- инфекции, присутствующие в легких пациентов с муковисцидозом из американских и британских центров. *Журнал клинической микробиологии*, **49** (1), 281- 291.
- Стертон Г., Перссон К. и Барнс П.Дж. (2008) Малые дыхательные пути: важная, но игнорируемая задача цель при лечении обструктивных заболеваний дыхательных путей. *Тенденции в фармакологических науках* , **29**(7), 340-345.
- Свифт Д., Асгарян Б. и Кимбл Дж.С. (2007) Использование математического аэрозольного осаждения- модели прогнозирования распределения вдыхаемых терапевтических аэрозолей при Вдыхании

Аэрозоли: физическая и биологическая основа терапии, 2-е издание

(ред. А.Дж. Хикки), Informa Healthcare, Хобокен, Нью-Джерси. Таки, М.,

Марриотт, К., Цзэн, Х.-М. и Мартин, Г.П. (2011) Производство "аэроди-

ингаляционные порошки, эквивалентные по названию лекарственным средствам и вспомогательным веществам, с

использованием новой технологии фракционирования. *Европейский журнал фармацевтики и биофармацевтики*, 77(2),

283 - 296. Танг П., Чан Х.К. и Рэпер Дж.А. (2004) Прогнозирование аэродинамического диаметра частиц

с шероховатыми поверхностями. *Порошковая технология*, 147(1 - 3), 64 - 78.

Тарара, Т.Э., Хартман, М.С., Джилл, Х. *et al.* (2004) Характеристика приостановления на основе

составы для дозированных ингаляторов, состоящие из высушенных

распылением микрокристаллов будесонида. *Фармацевтические исследования*, 19(9), 1607-1614.

W.Y., Pearson, S.B., Assi, K.H. и Chrystyn, H. (2006) Оценки выброшенной дозы

от Seretide[®] Дискус[®] и Симбикорт[®] после выдыхания сильного Турбухалера[®]
астматики. *Международный журнал фармацевтики*, 316(1 -2), 131- 137.

Группа экспертов по технологии и экономической оценке (2009) Монреальский протокол по веществам, которые

Отчет о ходе работы по разрушению озонового слоя, Программа

Организации Объединенных Наций по окружающей среде, Найроби. Тэн С.Л.,

Ван П., Чжу Л.Дж. *et al.* (2009) Экспериментальный и численный анализ

лабораторной жидкостной энергетической. *Порошковая технология*, 195(1), 31 - 39.

Тьеринг Р., Дехгани Ф. и Фостер Н.Р. (2001) Текущие проблемы, связанные с антирастворителями

методы микронизации и их распространение на промышленные масштабы. *Журнал*

о сверхкритических жидкостях, 21(2), 159- 177.

Торссона, л. Кеньон, Э. Ньюмен, П. С. и Borgstrom, л. (1998) легкое напыление

будесонид у астматиков: сравнение различных составов. *Международный*

фармацевтический журнал, 168 (1), 119-127. Тонг, Х.Х.Я.,

Шекунов О.Ю., Йорк П. и Чоу, А.Х.Л. (2005) Характеристика поверхности-

определение порошков сайметерола ксинафогата методом обратной газовой

хроматографии при ограниченном покрытии. *Журнал фармацевтических наук*, 94 (3), 695 - 700.

Tronde, A., Norden, B., Marchner, H. *et al.* (2003) Скорость всасывания в легких и биодоступность-

способность лекарственных средств in vivo у крыс: взаимосвязь структуры и абсорбции и физико-химическое

профилирование ингаляционных лекарственных средств. *Журнал фармацевтических наук*, 92 (6), 1216-1233.

Велага С.П., Бергер Р. и Карлфорс Дж. (2002) Кристаллизация будес в сверхкритических жидкостях-

онид и флунизолид. *Фармацевтические исследования*, 19(10), 1564 - 1571.

Вербанк С., Верве С., Шуерманс Д. и Винкен В. (2004) Профиль аэрозоля

выделенный из спейсеров как фактор, определяющий фактическую дозу. *Фармацевтические исследования*, 21(12), 2213-2218.

Верстиг, Х.К., Харгрейв, Г.К. и Кирби, М. (2006) Внутренний поток и распыление вблизи отверстия

визуализация модели фармацевтического дозированного ингалятора под давлением. *Журнал*

физики: серия конференций, Вторая международная конференция по оптической и лазерной

диагностике., 45 207-213. Верве, С. и Байрон, П.Р. (1999) Взаимодействия

лекарственного средства, поверхностно-активного вещества и пропеллента при ГФА-

рецептуры. *Международный фармацевтический журнал*, 186 (1), 13-30.

Вьегги Г., Аннети И. и Маттеелли Г. (2003) Эпидемиология астмы. *Европейская респираторная монография.-*

тори, 8(23), 1- 25.

Йорд, Г.Х. и Шульц, Р.К. (1995) Изменения кристалличности альбутерола, вызванные технологическим процессом

сульфат и его влияние на физическую стабильность порошка. *Фармацевтические исследования*, 12(5),

773 -779.

- Weibel, E.R. (1963) *Морфометрия легких человека*, Springer-Verlag, Berlin.
- Вейлер К., Волькенхауэр М., Транк М. и Ланггут П. (2010) Новая модель, описывающая полное диспергирование сухих порошковых агломератов. *Порошковая технология*, **203**(2), 248-253. Уайт С., Беннетт Д.Б., Чу С. *et al.* (2005) EXUBERA: фармацевтическая разработка нового продукта для доставки инсулина в легкие. *Технология и терапия диабета.*, **7**(6), 896-906. Уиддиком, Дж.
- (1997) Проницаемость дыхательных путей и альвеол и толщина поверхностной жидкости:- Журнал прикладной физиологии. *Журнал прикладной физиологии*, **82**(1), 3 -12.
- Уильямс, Р.О. и Лью, Дж. (1998) Влияние добавок в рецептуру на давление паров - уверены в гидрофторалкановых пропеллентах. *Международный фармацевтический журнал*, **166** (1), 99 -103.
- Вонг У., Флетчер Д.Ф., Траини Д. *et al.* (2010) Аэрозолизация и дробление частиц в ингаляторах для сухого порошка 1: оценка и моделирование эффектов вентури для агломератов. *Фармацевтическая технология*, **1**(1), 1-10.
- (2011) Назвала 10 основных причин смерти, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs310/en/index2.html> (последнее обращение 15 августа 2013 г.).
- Уорт Лонгет, П., Хиндл, М. и Дас Чоудхури, С. (2009) Влияние времени образования на перенос и осаждение аэрозоля при распылении в моделях геометрии полости рта и горла. *Журнал аэрозольной медицины и доставки лекарств в легкие*, **22**(2), 99-112.
- Йорк П., Тайсхерст М.Д., Осборн Дж. *et al.* (1998) Характеристика поверхностной энергии- получение измельченного dl-пропранолола гидрохлорида с использованием обратной газовой хроматографии и молекулярного моделирования. *Международный фармацевтический журнал.*, **174**(1-2), 179-186. Янг, П.М., Эдж, С., Траини, Д. *et al*(2005) Влияние дозы на работоспособность систем для ингаляции сухого порошка. *Международный фармацевтический журнал*, **296**(1-2), 26 -33. Ю., З.С., Джонстон К.П. и Уильямс Р.О. (2006) Замораживание распылением в жидкость по сравнению с распылением- сублимационная сушка: влияние распыления на агрегацию белка и биологическую активность. *Европейский журнал фармацевтических наук*, **27** (1), 9-18.
- Занен П., Го Л.Т. и Ламмерс Дж.В.Дж. (1998) Эффективность низких доз монодисперсного парасимпатиколитического аэрозоля в сравнении со стандартным аэрозолем из дозированного ингалятора. *Европейский журнал клинической фармакологии.*, **54**(1), 27-30. Zeng, X.M., Martin, G.P. и Marriott, C. (2001) *Взаимодействие твердых частиц в сухом порошке Составы для ингаляции*, Тейлор и Фрэнсис, Лондон.
- Цзэн, Х.М., О'Лири, Д., Фелан, М. *et al.* (2002) Поставка салбутамола и budesонид из нового многодозового ингалятора AiRmax (TM). *Респираторное лекарство*, **96**(6), 404-411. Чжао, К.К. и Шурр, Г. (2002) Влияние движущих газов на тонкое измельчение в жидкостно-энергетической мельнице. *Порошковая технология*, **122**(2 -3), 129- 135.
- Чжоу, К.Т., Цюй, Л., Ларсон, И. *et al.* (2010) Улучшение аэрозолизации лекарственных порошков за счет снижение внутренней когезии порошка с помощью метода механического сухого нанесения покрытия. *Международный фармацевтический журнал.* , **394** (1-2), 50-59.
- Чжоу, С.-Ф., Ван, Л.-Л., Ди, Ю.М. *et al.* (2008) Субстраты и ингибиторы mtl человека- белки, ассоциированные с лекарственной устойчивостью, и их значение для разработки лекарств. *Текущая медицинская химия*, **15** (20), 1981- 2039.

Биоаэрозоли и госпитальные инфекции

Ка ман Лай¹, Захир Ахмад Насир², и Джонатан Тейлор²

¹ Биологический факультет Гонконгского баптистского университета, Китай

² Исследовательский центр здоровой инфраструктуры, Департамент гражданского строительства и охраны окружающей среды & Геоматическая инженерия, Университетский колледж Лондона, Великобритания

11.1 Важность биоаэрозолей и инфекций

Растущие угрозы со стороны новых и зарождающихся заболеваний, таких как тяжелый острый респираторный синдром (ТОРС), пандемии гриппа, рост числа внутрибольничных инфекций и лекарственно-устойчивых патогенов, таких как туберкулез с широкой лекарственной устойчивостью (ШЛУ-ТБ), вновь вызвали обеспокоенность тем, что воздух играет ключевую роль в передаче заболеваний. Эксперты Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) предсказали, что " ... как минимум, от 2 до 7,4 миллиона человек могут умереть в результате следующей пандемии". (ВОЗ, 2005). Международное воздействие таких заболеваний было четко продемонстрировано во время вспышек атипичной пневмонии в 2002 и 2003 годах. В течение нескольких недель атипичная пневмония распространилась из Гонконга в 26 стран и стала причиной более 8000 случаев заболевания и 700 смертей по всему миру (ВОЗ, 2004). В одном исследовании сообщалось, что 40 медицинских работников заразились атипичной пневмонией в течение 6-недельного периода в общественной больнице; частота инфицирования была самой высокой у медицинских помощников (8%), за ними следовали врачи (5%) и медсестры (4%) (Хо, Сон и Чан-Ен, 2003). Условия в больницах особенно уязвимы для инфекций, потому что там собираются люди, являющиеся носителями инфекционных агентов, и те, кто подвергается наибольшему риску заражения. Учитывая огромный прогресс, достигнутый в медицинских технологиях и методах лечения, все больше пациентов во время курса лечения теряют иммунитет и, следовательно, становятся более восприимчивыми к инфекции (Хусейн *et al.*, 2003; ВОЗ, 2012). Использование антибиотиков в последние несколько десятилетий также способствовало появлению нового поколения устойчивых к лекарствам патогенов, превращая традиционно легко поддающиеся лечению инфекции в новые угрозы внутрибольничного инфицирования (WHO, 2012). Более того, современные технологии

и медицинское лечение потенциально могут обеспечить новые среды обитания и возможности для микроорганизмов размножаться, распространяться и заражать своих жертв (CDC, 2003). Качеством здравоохранения, больницы проектирования и управления объектами и больничной гигиены может также влиять риск передачи инфекции в стационарах (Duce, Фабри и Николь, 2002). Общемировой взгляд на бремя эндемических инфекций, связанных со здоровьем (HCAI) систематически рассматривался в отчете ВОЗ (WHO, 2011). Вкратце, распространенность HCAI в масштабах всей больницы (не полностью обусловленная биоаэрозолями) колебалась от 5,7 до 19,1% в течение отчетного периода, при этом общая распространенность HCAI в смешанных группах пациентов составила 7,6% в странах с высоким уровнем дохода. Отделения интенсивной терапии (ICU) и операционные представляют собой среду с наиболее высоким уровнем риска: показатель распространенности HCAI там составляет от 4,4 до 88,9%, в то время как пациенты, использующие инвазивные устройства и аппараты искусственной вентиляции легких, относятся к группе высокого риска. Бремя и издержки HCAI включают длительное пребывание в больнице, длительную нетрудоспособность, повышенную устойчивость микроорганизмов к противомикробным препаратам, огромное дополнительное финансовое бремя для систем здравоохранения, высокие затраты для пациентов и их семей и избыточную смертность. Согласно тому же отчету, HCAIs стали причиной 16 миллионов дополнительных дней пребывания в больнице, 37 000 связанных с этим смертей и ежегодных прямых финансовых потерь в размере около 7 миллиардов евро в Европе. В Соединенных Штатах HCAIs привели примерно к 99 000 смертей и за последние годы привели к ежегодным убыткам примерно в 6,5 миллиардов долларов США.

Биоаэрозоли являются важным источником инфекций; они особенно актуальны в двадцать первом веке в связи с различными проблемами здравоохранения, вызванными новыми и зарождающимися заболеваниями в условиях стационаров. Разработка соответствующих решений для снижения риска передачи инфекции может спасти жизни и снизить общее экономическое и социальное бремя.

11.2 Инфекции, связанные с биоаэрозолем, в больницах

В таблице 11.1 перечислены некоторые примеры инфекций, связанных с биоаэрозолями в больницах.

Микроорганизмы, способные вызывать инфекции, известны как патогены. Патогенные микроорганизмы могут возникать либо в окружающей среде, либо от хозяина (например, животных и человека). Те, которые могут использовать для передачи по воздуху путь передачи инфекции путем заражения дыхательной системы при вдыхании, называются воздушно-капельными патогенами. Хотя некоторые авторы называют патогенные микроорганизмы, которые используют Воздушно-десантный путь, чтобы вызвать инфекцию не способствуют дыхательные пути, как ВДВ Дис- облегчает, в этой главе мы будем использовать термин 'биоаэрозолей, связанных с инфекциями на все воздушно-десантные путей и/или пути передачи заболевания. Застарелые заболевания, такие как туберкулез (ТБ), и новые, такие как болезнь легионеров, впервые диагностированная в 1970-х годах, являются примерами инфекций, связанных с биоаэрозолями. Патогены, происходящие из природных источников, такие как *Legionella* spp. и *Aspergillus* spp., может иметь разнообразный диапазон местообитаний в окружающей среде, таких как почвы, водохранилища и строительные материалы (CDC, 2003). Одним из основных источников внутрибольничных инфекций в окружающей среде является строительство, снос, реконструкция и капитальный ремонт медицинских учреждений. Во время этих мероприятий патогенные микроорганизмы переносятся воздушно-капельным путем всякий раз, когда нарушается их среда обитания. В частности, споры видов плесневых грибов, которые эволюционировали, чтобы использовать воздушно-капельные пути для своего распространения, могут переноситься по воздуху лишь при незначительном изменении условий окружающей среды и движения воздуха.

Что касается передачи от человека к человеку, патогенные микроорганизмы, содержащиеся в дыхательных каплях, выделяются этими каплями, когда люди разговаривают, поют, кашляют, чихают или просто дышат. Респираторные капли различаются по размеру. Попадая в атмосферу, они быстро испаряются, образуя зародыши капель.

Таблица 11.1 Примеры инфекций, связанных с биоаэрозолем, в больницах.

Источник	Патогены / заболевания	Ссылки
Люди, например пациенты, медицинские работники и посетители	<i>Микобактерии туберкулеза</i> (ТБ), вирус ветряной оспы (ВЗВ), корь, инфл, uenza, риновирусы, аденовирусы, респираторно-синцитиальный вирус (RSV), метициллинрезистентный <i>Золотистый стафилококк</i> (MRSA), <i>Clostridium difficile</i> , устойчивый к ванкомицину <i>Enterococcus faecium</i> (VRE), норовирус	CDC (2003, 2004) и Макканнелл et al. (2011)
Наружные среды, например естественная и искусственная среда за пределами больниц (точные источники обычно неизвестны) Животные внутри (например, обслуживающие) животных) и вокруг (например, голубей) больницы	<i>Aspergillus</i> spp., <i>Candida</i> spp., <i>Гиадогифомицеты</i> , <i>Феогифомицеты</i> , <i>Зигомицеты</i> , <i>Coxiella burnetti</i> (Q-лихорадка), туляремия, иерсиниоз, бластомикоз, <i>Криптококк у низших</i> , <i>Криптококк gattii</i>	. (2003) et al Хусейн и CDC (2004) Вебер (1979) и ЦКЗ (2003)
Инфекции, связанные с строительством, сносом, реконструкцией и ремонтом учреждений здравоохранения, а также а также плохо обслуживаемой инфраструктуры, такой как старые и заброшенные фильтры и вентиляционные системы, связанные с водохранилищами	<i>Аспергилл</i> СПП., <i>Mucoraceae</i> , <i>Penicillium</i> вид., <i>Legionella</i> вид., нетуберкулезный микобактерии (NTM), <i>Синегнойная палочка</i> , <i>Ацинетобактер</i> spp., <i>Enterobacter</i> spp.	CDC (2003, 2004)
инфекций, например, воды в инженерных и строительных систем и медицинских устройств и оборудования; - внутрибольничные пневмонии (ГАП); вентилятор-ассоциированной пневмонии (ВАП)	<i>Золотистый стафилококк</i> , <i>Эпидермальный стафилококк</i> , бета-гемолитики группы А <i>Стрептококки</i>	CDC (2003, 2004) и ВОЗ (2011)
Инфекции в месте хирургического вмешательства (SSIS)	<i>Золотистый стафилококк</i> , <i>Эпидермальный стафилококк</i> , бета-гемолитики группы А <i>Стрептококки</i>	CDC (2003)
Распространение по воздуху инфекции, например, от паразитов, поверхностей из окружающей среды, белья и постельное белье, уборка, клинические отходы и обработка	Аэрозолизация патогенов из загрязненных материалов и осевших частиц; все патогенные микроорганизмы в этой таблице, имеющие человеческое происхождение, могут быть повторно суспендированы	CDC (2003)

Ядра, имеющие аэродинамический размер менее 5 мкм, поднимаются в воздух и могут надолго задерживаться в воздухе. Инфекции, которые передаются через эти капельные зародыши, такие как туберкулез, называются "воздушно-капельными", тогда как инфекции, которые возникают в результате капельного заражения, известны как "передача воздушно-капельным путем". Широко распространено мнение, что грипп передается преимущественно воздушно-капельным путем, хотя может происходить и воздушно-капельная передача (CDC, 2004; WHO, 2009a). Общее предположение заключается в том, что передача инфекции воздушно-капельным путем имеет радиус заражения около 1 м., из-за осаждения капель размером более 5 мкм в пределах этого диапазона. Это расстояние в 1 м используется для борьбы с инфекциями, передающимися воздушно-капельным путем (CDC, 2004; WHO, 2009a).

Капли также могут образовываться с помощью различных механизмов из резервуаров для воды, имеющихся в больничной среде, таких как небулайзеры, водяные ванны, гидротерапия, раковины, краны, аэраторы, душевые кабины, увлажнители воздуха, вентиляторы и смывные туалеты, все из которых расщепляют воду на капли (CDC, 2004). Биологический состав этих капель связан с содержанием микроорганизмов в водоемах. Может ли патоген передавать через воздушно-десантных или капли корпусного маршрута будет зависеть от его способности выжить в воздухе. Для примера, *Легионеллы* spp. может перемещаться в течение длительных периодов времени и на большие расстояния, в то время как для передачи других грамотрицательных патогенов, как правило, требуется тесный контакт, таких как (CDC, 2004).

В дополнение к передаче инфекции воздушно-капельным путем из окружающей среды и от человека источники, многие виды деятельности больниц могут генерировать огромное количество инфекционных биоаэрозолей из фомитов (CDC, 2003). Эти патогенные микроорганизмы не поражают дыхательную систему непосредственно через воздух; вместо этого они заражают восприимчивых людей через загрязнение поверхностей и, впоследствии, рук, или же заражают путем прямого осаждения биоаэрозолей на ранах, как в случае инфекций в месте операции (SSIS). Уборка в больницах, переработка и транспортировка медицинских отходов, стирка и приготовление постельного белья являются распространенными источниками биоаэрозолей в больничной среде. Воздух играет важную роль в рассеивании этих биоаэрозолей и контроле их путей распространения в окружающей среде после того, как они выбрасываются из своих источников.

В этой главе мы исследуем инфекции, связанные с биоаэрозолями, и обсуждаем, как наука об аэрозолях и технология внесли вклад в борьбу с инфекциями в больницах. Мы предполагаем, что читатель обладает некоторыми знаниями в области аэрозольной науки. Сначала мы кратко рассмотрим свойства биоаэрозолей и их отложение в дыхательной системе человека, а затем объясним три компонента (патогены, хозяева и пути распространения) в цепочке распространения инфекции в больничной среде, различные этапы инфекционного контроля, от проектирования больницы до сноса, и ведущие дисциплины, задействованные на каждом этапе. Одним из основных вкладов науки об аэрозолях и технологии в инфекционный контроль является понимание госпитальной аэробиологии, начиная с источника, аэролизации, стабилизации, переноса, осаждения, физических и биологических свойств и распада биоаэрозолей. Эти знания открыли многочисленные возможности для инфекционного контроля в различных дисциплинах проектирования, строительства и эксплуатации больниц. Присутствие уязвимых пациентов создает сложную проблему для проведения экспериментов с биоаэрозолями в больницах, доступ к которым затруднен, а иногда и ограничен. Таким образом, лабораторные эксперименты с биоаэрозолями помогли исследователям углубить их понимание физико-химических и биологических свойств биоаэрозолей, особенно в различных климатических условиях, и исследовать, разрабатывать и тестировать устройства для очистки воздуха и другие технологии, используемые в борьбе с инфекциями и исследованиях аэрозолей. В сочетании с лабораторными экспериментальными инструментами численного моделирования способствуют прогнозированию и симуляции

биоаэрозоля динамика и разгон частиц, и, как было показано, чтобы быть полезным в больничном дизайне и оптимизация эффективности контроля за инфекцией. Были разработаны различные отдельно стоящие воздухоочистительные устройства и встроенные системы воздухоочистки на основе различных технологий очистки воздуха, таких как фильтрация, разбавление и дезактивация. Некоторые из этих технологий в настоящее время являются стандартными мерами инфекционного контроля, в то время как другие все еще находятся в стадии разработки.

11.3 Свойства биоаэрозоля и его отложение в дыхательных системах человека

Несколько элементов в литературе рассмотрели биоаэрозолей свойства аэрозоля и депозитных по отношению к физиологии дыхательной системы человека (МКРЗ, 1994; Хиндс, 1999; Сосновский, 2011). Короче говоря, дыхательная система действует как фильтр для улавливания аэрозолей посредством механизмов столкновения, перехвата, диффузии и оседания. Аэродинамический размер аэрозоля является одним из основных факторов, определяющих его локализацию и эффективность осаждения в дыхательной системе. Другие факторы включают форму, гигроскопичность и поверхностные свойства аэрозоля, геометрию дыхательных путей и характер дыхания. В генеральном, биоаэрозоли менее 5 мкм могут путешествовать в легких, и тем больше, чем 5 мкм в основном с фильтрацией по ноздри. Как и в других фильтрах, наименьший размер частиц (диаметр) фильтрационной эффективности в дыхательной системе находится в диапазоне от 0,1 до 1,0 мкм, где ни один из этих механизмов является доминирующим (Сосновский, 2011). На свойства биоаэрозоля влияют природа микробов, их источник и механизм аэрозолизации, а также климатические условия. Капельные аэрозоли, выбрасываемые из водных источников, таких как водохранилища и дыхательные системы, подвергаются испарению и последующему образованию зародышей капель. Скорость испарения и конечный размер этих капель определяются относительной влажностью (RH) и температурой атмосферы (Hinds, 1999).

11.4 Цепочка заражения и инфекционный контроль в больницах

Для формирования целостной цепочки заражения требуются три основных компонента: *патогены* (от инфицированных хозяев или загрязненной среды, в адекватной дозе и с достаточной вирулентностью); *пути* (соответствующие способу передачи); и восприимчивые *хозяева* (с правильным порталом входа в личное пространство) (рисунок 11.1). Больничная среда может (и оказывает) воздействие на все эти компоненты с целью вызвать инфекцию.

Цель инфекционного контроля состоит в том, чтобы разорвать эту цепочку путем устранения любого из компонентов или нахождения барьера, блокирующего их проникновение. Например, если больные туберкулезом изолированы от населения в целом, связь между патогенами и восприимчивыми людьми разрывается. Увеличение притока свежего воздуха за счет открытия окон может эффективно разбавлять и удалять противотуберкулезные аэрозоли и, следовательно, снижать уровень заражения туберкулезом, даже если больные туберкулезом и восприимчивые лица находятся в одной среде. В идеале инфекционный контроль должен начинаться с раннего этапа проектирования больницы и продолжаться до конца срока ее службы. Тип и количество пациентов, характер их заболеваний и методов лечения, соответствующая стратегия инфекционного контроля и особенности инфекционного контроля больницы должны быть определены и интегрированы в первоначальный план проектирования. Важно, когда меняются

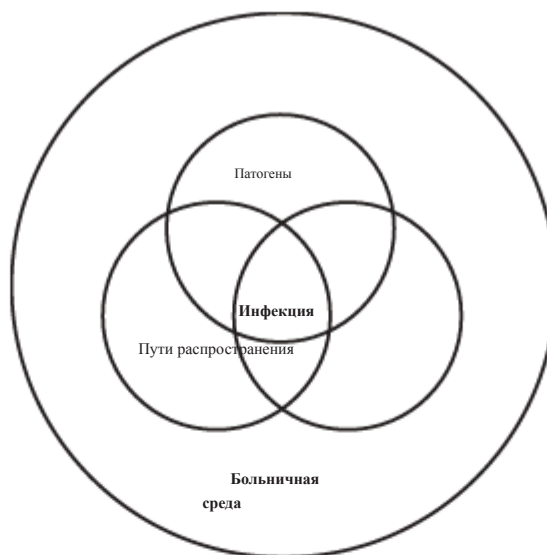


Рисунок 11.1 Цепочка заражения в больничной среде.

если в течение срока службы больницы необходимо разработать новый план проектирования, строительства, охраны окружающей среды и инфекционного контроля. Больницы представляют собой один из самых сложных типов зданий из-за наличия разнообразных, но взаимозависимых функциональных подразделений, таких как палаты, лаборатории, изоляторы, офисы и общественные зоны. Все эти устройства могут содержать патогенные микроорганизмы и позволять им проходить через людей и окружающую среду и подвергать перекрестному загрязнению через передвижение людей, воздух, воду, отходы и другие загрязненные объекты. Они могут прямо или косвенно способствовать инфицированию как отдельная причина или как серия взаимосвязанных событий. В последние годы активно пропагандировалась концепция "встроенного" инфекционного контроля в больничной среде (Wilson and Ridgway, 2006; Ulrich, 2006). В Соединенном Королевстве Министерство здравоохранения является агентом, ответственным за предоставление руководящих принципов по строительству больниц и управлению ими (посредством Технического меморандума о здравоохранении, НТМ; Министерство здравоохранения, 2007а, б). В США Центры по контролю и профилактике заболеваний (CDC) разрабатывают различные руководства по инфекционному контролю. После того, как больница построена, помещения сдаются в эксплуатацию, и с этого момента команда по управлению объектами берет на себя ответственность за техническое обслуживание больницы и окружающей среды. Однако, при различных структурах управления в каждой больнице объем управления учреждением и предоставления услуг может сильно различаться. В Великобритании ведутся жаркие дебаты по поводу того, обеспечивает ли схема частной финансовой инициативы (PFI) при строительстве и обслуживании больниц контроль инфекций в результате некачественных строительных работ, плохого управления помещениями и высоких эксплуатационных расходов и технического обслуживания (Листер, 2003). Facility management обеспечивает функциональность встроенной среды, но не обеспечивает контроль заражения. Например, как упоминалось ранее, открытие окон может увеличить подачу свежего воздуха для разбавления противотуберкулезного аэрозоля. Однако функционирующее окно, которое можно открывать и закрывать, не гарантирует, что будет достигнуто достаточное разрежение воздуха. Команда инфекционного контроля, состоящая из медсестер инфекционного контроля, микробиологов-консультантов и ученых-клиницистов, отвечает за ежедневный надзор и контроль за инфекциями; его работа в значительной степени определяется случаями заражения и основана на микробиологических и эпидемиологических подходах. С точки зрения окружающей среды

с этой точки зрения, CDC и Консультативный комитет по практике инфекционного контроля в здравоохранении (НЦРПАС) рекомендуют руководящие принципы инфекционного контроля в семи областях: воздух, вода, психиатрические услуги, отбор проб окружающей среды, стирка белья и постельных принадлежностей, животные в медицинских учреждениях и регулируемые медицинские отходы (CDC, 2003). Таблица 11.2 иллюстрирует ведущие дисциплины на различных этапах строительства и эксплуатации больничных зданий - от строительства больницы до сноса - и показывает компоненты инфекционного контроля окружающей среды. В дискуссии вокруг применения аэрозоля науки и техники в инфекции кон- троля, целью данной таблицы является разработка широкого спектра аэрозоля науки и техники применения различных дисциплинах и на различных этапах больницы всю жизнь.

11.5 Применение аэрозольной науки и технологии в борьбе с инфекциями

11.5.1 Понимание больничной Аэриобиологии и инфекционного контроля

Различные методы, используемые при отборе проб аэрозолей и биоаэрозолей, способствуют пониманию их источников, механизмов аэрозолизации, путей воздействия на окружающую среду и процессов передачи и, в конечном счете, разработке инструментов и стратегий инфекционного контроля. Паскуарелла, Питцурра и Савино (2000) рассматривают преимущества и недостатки различных методов отбора проб биоаэрозоля в больницах, которые в целом подразделяются на активный и пассивный отбор проб. Активный отбор проб включает в себя ударные устройства, фильтрационные пробоотборники, импингеры, центробежные пробоотборники, пробоотборники электростатических осадков и термические пробоотборники осадков. Все они собирают известный объем воздуха, что означает, что уровень загрязнения выражается как измерение количества микробного агента (например, колониеобразующих единиц (КОЕ), ДНК, АТФ, ферментов и единиц, образующих зубной налет) на единицу объема воздуха. Пассивный отбор проб не требует механических насосов и основан на осаждении аэрозолей на устройствах для сбора. Пассивный отбор проб с помощью отстойных пластин обычно используется в больницах для оценки количества частиц, находящихся в воздухе, и, следовательно, уровня биоаэрозагрязнения поверхности. При мониторинге общего уровня аэрозолей (жизнеспособных или нежизнеспособных, биологических или небиологических) могут использоваться различные счетчики частиц для индикации выбросов и загрязнения аэрозолями окружающей среды. Пассивный отбор проб рекомендован CDC в качестве инструмента мониторинга контроля взвешенных частиц в воздухе на строительных площадках в больничной среде (CDC, 2003).

На рисунке 11.2 показана динамика аэриобиологии из различных примеров источников и подробно описывается, как человеческие факторы, искусственная среда и параметры окружающей среды влияют на перенос биоаэрозолей, их распад, рассеивание и передачу. Такого рода информация является основой для разработки и внедрения различными дисциплинами, как показано в таблице 11.2, конкретных мер инфекционного контроля. Более того, понимая процессы и факторы, которые влияют на аэриобиологию больницы, можно определить конкретные показатели, которые могут быть применены для мониторинга воздушной среды в помещениях, таких как операционные. В Великобритании НТМ 03-01 рекомендует, чтобы уровни биоаэрозоля (бактерий и грибов) не превышали 10 КОЕ /м³ воздуха, когда театр пуст, и чтобы они не превышали 180 КОЕ /м³ в среднем выдерживается в течение любых 5 минут, если только в помещении нет высокого уровня персонала и активности (Департамент здравоохранения, 2007b). Даран и Питте (2002) сообщают, что при высокой эффективности улавливания твердых частиц задерживаемых (HEPA-фильтры), работая в театре вентиляции, существует тенденция применять подсчет частиц в качестве промышленного стандарта для технологии чистых помещений

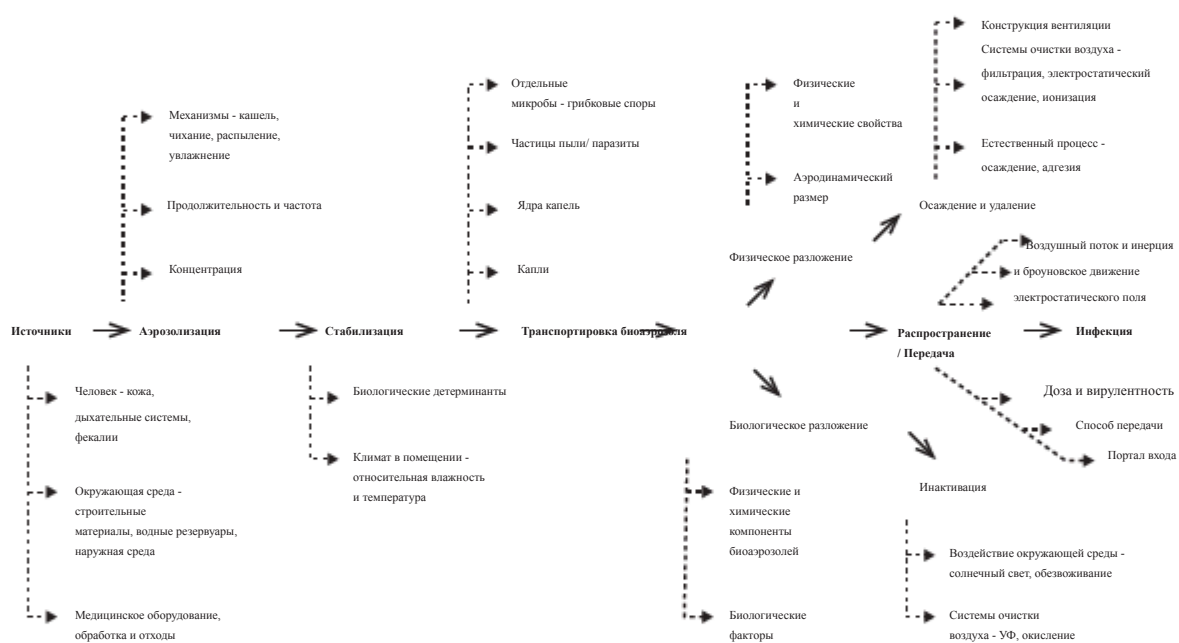


Рисунок 11.2 Динамика аэриобиологии в условиях стационара.

в больницах. Однако Ландрин, Биссер и Кац (2005) не обнаружили корреляции между количеством частиц и количеством бактерий в своих исследованиях операционных, и, следовательно, подсчет частиц не может заменить микробиологический отбор проб. Учитывая понимание того, что инфекция и борьба с ней - это процессы и что различные факторы могут изменять и усиливать их воздействие коллективно в режиме реального времени, Панкхерст *et al.* (2011) подробнее расскажут об использовании подсчета частиц, от инструмента выборочной проверки до средства оценки профиля частиц (размера и количества частиц), рассеивания во времени и пространстве при различных операционных сценариях. Их подход проливает свет на аэрозольный путь распространения и иллюстрирует, как разные виды деятельности и здания и оборудования параметров, связанных больнице окружающей среды, людей и аэрозолей взаимодействие может влиять на разбавление, удаление, направление потока и распределения аэрозолей.

Благодаря пониманию госпитальной аэробиологии можно разработать более совершенную стратегию отбора проб аэрозолей и биоаэрозолей, с помощью которой можно определить критические сроки и места отбора проб и обеспечить инфекционный контроль. Будущее развитие системы мониторинга и оценки на основе аэрозолей позволит группам инфекционного контроля отслеживать источник, прогнозировать и предотвращать текущую и будущую передачу и разрабатывать стратегию инфекционного контроля для конкретного участка. Было разработано несколько оптических детекторных устройств, основанных на флуоресценции и / или упругом рассеянии, чтобы отличать биологические аэрозоли от небιологических, и это еще больше продвинет наши нынешние знания и технологические приложения (Huang *et al.*, 2008; Шивапракасам *et al.*, 2011).

11.5.2 Эксперименты и модели с биоаэрозолями

Развитие лабораторного оборудования, позволяющего проводить исследования физико-химических (например, скорости испарения, аэродинамических размеров и поверхностных зарядов) и биологических (например, инфекционности, культивируемости и живучести) свойств биоаэрозолей, а также разработка технологии очистки воздуха позволили добиться значительных успехов в фундаментальной аэрозольной науке и ее применении в борьбе с инфекциями. Аппарат Хендерсона, который направляет биоаэрозоли в камеру для животных, и вращающиеся барабаны Голдберга, которые удерживают биоаэрозоли в воздухе в течение длительных периодов времени, были одними из самых ранних устройств, разработанных для проверки инфекционности и выживаемости биоаэрозолей соответственно (Хендерсон, 1952; Голдберг., 1958; Голдберг, 1971). На основе этой ранней работы было начато фундаментальное исследование, касающееся зависимости инфекционной дозы от дозы и времени выживания биоаэрозолей при различных температурах и уровнях относительной влажности. Тан (2009) проанализировали влияние параметров окружающей среды (в основном температуры и относительной влажности) на выживаемость инфекционных агентов, переносимых воздушно-капельным путем (вирусов, бактерий и грибов). В

как правило, вирусные аэрозоли дольше сохраняются при низкой температуре (ниже 10 °C), чем при высокой-температуре (выше 30 °C), в то время как бактериальные аэрозоли быстрее разлагаются при температуре примерно 24 °C. Что касается влияния резус-фактора, вирусы с липидной оболочкой (например, грипп, атипичная пневмония, респираторно-синциальный вирус, корь, краснуха, ветряная оспа и парогриппозные вирусы) дольше выживают при более низкой относительной влажности (20-30%), чем вирусы без липидной оболочки (например, аденовирусы и риновирусы), которые дольше выживают при относительной влажности от 70 до 90%. Эти свойства могут способствовать сезонному эффекту различных респираторных заболеваний; Атипичная пневмония, пик которой приходится на зимнее время, связана с восприимчивостью вируса к высоким температурам и относительной влажности после зимнего сезона (ВОЗ, 2004). Резус-фактор оказывает менее выраженное влияние на различные группы бактерий. Однако грамположительные бактерии обычно дольше выживают в воздухе, чем грамотрицательные бактерии, из-за их структуры клеточной стенки и того факта, что некоторые грамположительные бактерии могут образовывать споры, такие как

Clostridium difficile, которые делают их стойкими и чрезвычайно трудными для очистки в домашних условиях. Споры грибов обладают теми же экологическими свойствами, что и споры бактерий.

Аэродинамические трубы - это еще одно лабораторное оборудование, которое широко используется для исследований, разработки и тестирования устройств для отбора проб аэрозолей и биоаэрозолей, таких как разработка персональных пробоотборников ИОМ (Института медицины труда) (Mark *et al.*, 1990).

Испытательная камера размером с комнату также использовалась в различных исследованиях для имитации условий больницы (изолированные помещения очень восприимчивы к распространению возбудителей воздушно-капельным путем) и для проверки эффективности технологии очистки воздуха (например, ультрафиолетовое бактерицидное облучение верхних помещений (UVGI); Miller *et al.*, 2002). Эти лаборатории являются результатом знания и навыки в области аэрозольных науки в последние несколько десятилетий; услуги включают в себя разработку безопасных лабораторных условий для биоаэрозолей исследования, развития aerosolisation методами, отбор проб биоаэрозоли, анализ физико-химических свойств аэрозоля и измерения аэрозолей, движения и распределения.

Недавно, из накопленных знаний о физико-химических и биологических свойствах биоаэрозоли в разных климатических условиях, математические модели были разработаны, чтобы описать эти свойства и применять эти знания для прогнозирования биоаэрозолей разгон и поведения в различных средах. Используя методы моделирования, Parienta *et al.* (2011) сообщили о теоретическом анализе движения и испарения выдыхаемых дыхательных капель.

11.5.3 Численный анализ дисперсии частиц в больницах

Моделирование передачи инфекции представляет собой сложный процесс, включающий такие факторы, как характеристики патогена, восприимчивость хозяина и среды, через которые происходит заражение. Модели воздушного потока, такие как многозонные модели и вычислительная гидродинамика (CFD), использовались для моделирования и исследования воздушного потока и рассеивания загрязняющих веществ в медицинских учреждениях с целью поддержки проектирования и эксплуатации больниц. Эти инструменты могут быть использованы для проектирования систем вентиляции и пространственной планировки, оказания помощи в расследовании вспышек заболеваний и оптимизации эффективности мер инфекционного контроля.

Многозонные модели можно использовать для моделирования перемещения воздуха и биоаэрозолей из помещения в помещение, рассматривая каждое помещение как отдельный узел в модели, а потенциальные пути воздушного потока - как связующие звенья. Однако такие модели ограничены в том, что они не учитывают локальный воздушный поток внутри помещений, например, нарушение воздушного потока, вызванное перемещением мебели. Тем не менее, они просты в вычислительном отношении и продемонстрировали хорошие оценки эксплуатационных характеристик целых зданий (Асфур и Гади, 2007). Многозонные модели использовались для прогнозирования распространения вирусов по больницам (Лим, Чо и Ким, 2011) и в изоляторах (Йик и Пауэлл, 2003), а также для изучения эффективности устройств для очистки воздуха в больничной среде (Никас и Миллер, 1999).

CFD - это более сложный метод расчета расхода воздуха, при котором объемы помещений дискретизируются в определенные ячейки, а физические модели используются для расчета движения воздуха внутри отдельного помещения в соответствии с граничными условиями. Различные модели CFD-els имеются в продаже и широко используются в промышленности и исследованиях для моделирования рассеивания и осаждения частиц в воздухе; они также широко применяются в различных аспектах борьбы с инфекциями. Лю и Чжай (Liu and Zhai, 2007) рассмотрели и оценили критерии, используемые для определения подходящих моделей CFD (модели ленивых частиц, модели изотермических частиц и модели свободно падающих частиц) для моделирования различных типов аэрозолей. Согласно

согласно их выводам, число топки и эффективность испарения являются критическими факторами обоснования при определении подходящих моделей.

Операционные - одно из мест с самым высоким уровнем инфекционного риска в больницах. CFD-модули els были применены для исследования конструкции вентиляции и влияния деятельности человека, рабочих процедур и внутренней планировки на рассеивание и осаждение частиц в воздухе. Мемарзаде и Мэннинг (2002) использовали модели CFD для оценки влияния типа и расположения диффузора, скорости вентиляционного потока, температуры приточной среды и расположения вытяжки на риск SSIS и для определения эффективности различных вентиляционных систем при удалении частиц. Ву, Чжэн и Чу (2011) обнаружили, что максимальная скорость удаления загрязняющих веществ в операционных достигается, когда воздушный диффузор установлен непосредственно над хирургической кроватью, а вентиляционное отверстие для выпуска воздуха расположено на стене, близко к полу. Руи, Гуанбэй и Джихонг (2008) провели численное моделирование для расчета рассеивания частиц в двух недавно построенных операционных залах ISO класса 5 и класса 6. Чоу и Янг (2005) и Чоу, Лин и Бай (2006) заметили, что изменения скорости подачи воздуха и положения медицинской лампы могут серьезно влиять на перемещение инфекционных частиц. Согласно Zoon *et al.* (2010), разные формы ламп приводят к разным схемам протекания, но в их исследовании это не оказывает существенного влияния на риск заражения. Что касается влияния передвижения людей на перенос загрязняющих веществ, исследование, проведенное Брохусом, Баллингом и Джеппесеном (2006), показывает значительный риск переноса загрязняющих веществ из менее чистых зон в сверхчистые зоны во время ортопедических операций в условиях ламинарного потока.

В условиях палаты Мазумдар *et al.* (2010) изучили влияние движения с помощью *et al*

посетители и обслуживающий персонал, смена постельного белья пациентов и открывание входных дверей в зависимости от концентрации загрязняющих веществ в стационарной палате с принудительной вентиляции. Их результаты показывают, что движущиеся объекты могут вызывать колебания распределения концентрации загрязняющих веществ на 10-90 секунд и что на изменение концентрации загрязняющих веществ в значительной степени влияет близость движущихся объектов к источнику загрязняющих веществ. Чжао *et al.*

(2009) смоделировали количество частиц, выбрасываемых из тела медсестры, которые попадают в зону дыхания пациента, и обнаружили, что наибольшая вероятность попадания некоторых частиц в тело пациента возникает, когда медсестра наклоняется над пациентом, а не стоит рядом.

Ip *et al.* (2007) смоделировали вероятность распространения инфекционных аэрозолей от пациентов с респираторными инфекциями, использующих кислородные маски; они рекомендовали рассматривать область в пределах не менее 0,4 м от пациента, использующего кислородную маску, как потенциальную внутрибольничную зону опасности. Существует много других примеров использования методов CFD для улучшения инфекционного контроля в больницах, и вполне вероятно, что в будущем это применение расширится.

11.5.4 Технологии очистки воздуха

Воздействие биоаэрозолей на окружающую среду может быть снижено с помощью комбинации технологий очистки воздуха, таких как фильтрация, вентиляционное разрежение, направление воздушного потока и дезактивация (рис. 11.2). Эти технологии могут быть встроены в инфраструктуру здания или использоваться как отдельно стоящие единицы. В условиях больниц крайне важно поддерживать высокое качество чистого воздуха, свободного от патогенов, с целью ограничения распространения инфекции, что делает очистители воздуха в помещениях важным фактором при проектировании и эксплуатации зданий.

В нескольких книгах и руководствах рассматриваются различные технологии, связанные с очисткой воздуха во внутренних помещениях и больницах (Департамент здравоохранения, 2007а, b; Ковальски, 2012). В этом разделе мы обсудим фильтрацию, разбавление и направление воздуха, УФ-излучение, отрицательную ионизацию воздуха

и пассивных систем, чтобы проиллюстрировать широкий спектр научных и технологических подходов к аэрозолям и подчеркнуть потенциальные проблемы, которые необходимо рассмотреть.

11.5.4.1 Фильтрация

Системы фильтрации физически удаляют загрязняющие вещества из воздуха в помещении и могут быть установлены в системе отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC) или в переносном фильтрующем устройстве. В больницах системы фильтрации HVAC обычно состоят из комбинированного предварительного фильтра и блока фильтрации, при этом предварительный фильтр удаляет крупные частицы перед змеевиком нагрева / охлаждения и основным фильтром. Основные фильтры в условиях стационара должны иметь эффективность не менее 90% для частиц размером от 1 до 5 мкм, но в более критических зонах с ослабленным иммунитетом у пациентов следует использовать фильтр более высокого стандарта. В Великобритании в руководстве HTM 03-01 перечислены соответствующие категории фильтров в определенных условиях (Министерство здравоохранения, 2007а). В США требования к фильтрации для различных типов больничных палат были предложены ASHRAE и AIA (ASHRAE, 1999; AIA, 2001). Фильтры также могут иметь противомикробное покрытие, чтобы свести к минимуму способность патогенов выживать на них. При принятии решения о модернизации системы фильтрации ОВКВ с использованием более эффективных фильтров необходимо учитывать возможную повышенную потерю давления в системе, что может привести к уменьшению расхода воздуха и ухудшению вентиляции в целом. Кроме того, утечка в системе ОВКВ может означать, что повышенная фильтрация, обеспечиваемая более эффективными фильтрами, не приведет к повышению качества воздуха в помещении. Портативные установки фильтрации воздуха также используются в больницах для фильтрации воздуха в помещениях, но их преимущества не так хорошо известны, как у стационарных установок фильтрации. Портативные HEPA-фильтрующие установки доказали свою эффективность в удалении из больничной среды (Абдул Салам *et al.*, 2010).

11.5.4.2 Разрежение и направление воздуха

Вентиляционное разрежение воздуха в помещении является эффективным способом снижения уровня загрязняющих веществ. В Великобритании рекомендуемая частота вентиляции варьируется в зависимости от условий больницы, как показано в рекомендациях HTM 03-01 (Министерство здравоохранения, 2007а, б). Операционные залы имеют высокие требования выше 25 воздухообменов в час (ACH), а вентиляция-вом ставок в общих палатах рекомендуется установить до 6 Ач. В некоторых странах с ограниченными ресурсами механическая вентиляция легких может быть недоступна; ВОЗ представила руководство по проектированию системы естественной вентиляции для борьбы с инфекцией в этих условиях (WHO, 2009b). Естественная вентиляция и вентиляция с гибридным или смешанным режимом работы также были рекомендованы в более широких помещениях, чтобы снизить энергозатраты на эксплуатацию механической системы (ВОЗ, 2009b).

Среди всех процедур борьбы с переносимыми воздушно-капельным путем патогенами наиболее эффективным способом полного уничтожения загрязняющих веществ из окружающей среды внутри помещений является контроль источника. Местные системы вытяжной вентиляции могут быть установлены вокруг помещений для пациентов, чтобы быстро удалять загрязненный воздух. Методы местной вытяжной вентиляции включают установку палаток и кабинок вокруг инфекционного пациента; эти системы использовались в помещениях больниц в качестве метода контроля инфекции у источника (Leung and Chan, 2006). Однако для того, чтобы этот метод был эффективным, источник должен быть известен.

Регулировка перепадов давления таким образом, чтобы воздух и загрязняющие вещества направлялись вниз из зон высокого давления в зоны низкого давления, является обычным инженерным решением в системах инфекционного контроля. Избыточное давление помещения должны обеспечивать приток воздуха из них (например, из помещений

пациентов, восприимчивых к инфекции) в окружающую среду, тогда как отрицательное давление помещения направляют воздух из окружающей среды в палату пациента, чтобы избежать распространения инфекционных агентов из них в окружающую местность (например, из палат больных туберкулезом). В операционных воздушные потоки, управляемые перепадами давления, перемещаются из сверхчистых зон в чистые зоны, в коридоры и, наконец, в зоны утилизации (Министерство здравоохранения, 2007а, б). При установлении перепада давления необходимо соблюдать осторожность, чтобы избежать трещин или дефектов в конструкции, которые могли бы позволить воздуху балансировать между зонами. Кроме того, открытие дверей может привести к кратковременному нарушению перепада давления, что приведет к распространению инфекции *et al.*, 2005).

11.5.4.3 Дезактивация Ультрафиолетовым бактерицидным облучением

(UVGI). Системы UVGI (254 нм) используются для дезинфекции воздуха в помещениях в переносных установках, системах верхних помещений и системах ОВКВ. Их эффективность зависит от восприимчивости биоаэрозолей к ультрафиолетовому излучению (зависит от относительной влажности, температуры, покрытия и группы микроорганизмов) и дозы ультрафиолетового излучения, фактора интенсивности облучения и времени, на которые влияют уровни перемешивания воздуха, которым подвергаются биоаэрозоли (Miller *et al.*, 2002). УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ излучение может быть вредным, поэтому чистящее устройство должно быть устроено таким образом, чтобы ни один человек по ошибке не подвергся прямому воздействию света. Устройства обычно устанавливаются в воздуховодах приточно-вытяжных установок ("in-channel") или на потолках или стенах, чтобы направлять свет вверх, а не на кого-либо в помещении ("верхняя комната") (First ., 1999а, б).

Хотя этого может быть недостаточно для обеспечения надлежащей очистки воздуха самого по себе, UVGI можно использовать в качестве дополнительного средства для дезинфекции воздуха в сочетании с установками фильтрации внутри помещений, поскольку их воздействие носит аддитивный характер. CDC рекомендует UVGI в качестве дополнительного инженерного контроля в больницах (CDC, 1994).

Обсуждаемые здесь технологии были широко изучены и доказали свою эффективность как экспериментально, так и эпидемиологически. Однако ионизация отрицательного воздуха и пассивные системы, покрытые противомикробными материалами, наночастицами и фотокаталитическими агентами, были менее изучены в условиях стационара. Клинические и эпидемиологические данные об этих технологиях несколько ограничены, и способы их действия еще до конца не изучены. Они обсуждаются в этой главе, чтобы подчеркнуть их сложность и проиллюстрировать широкий контекст, в котором наука об аэрозолях может быть применена для борьбы с инфекциями.

Отрицательная ионизация воздуха. Теоретически, отрицательно заряженные ионизаторы воздуха генерируют отрицательно заряженные ионы воздуха, которые сталкиваются с биоаэрозолями и заряжают поверхность биоаэрозоля. Заряженные биоаэрозоли имеют тенденцию скапливаться и выпадать из воздуха из-за своего веса, который больше, чем у оригинальных биоаэрозолей. Kett *et al.* (2006) обнаружили, что использование отрицательных ионизаторов воздуха снижает количество инфекций за счет: *Acinetobacter* но не метициллинрезистентным Золотистым стафилококком (MRSA) в отделении интенсивной терапии. Таким образом, эти данные, по-видимому, подтверждают идею о том, что воздушно-капельный путь передачи имеет важное значение в эпидемиологии внутрибольничных инфекций. Однако более позднее исследование показало, что отрицательные ионизаторы воздуха также могут заряжать поверхность пластикового медицинского оборудования и могут способствовать уменьшению загрязнения поверхности бактериями за счет отталкивания бактерий от поверхности (Shepherd *et al.*, 2010). Эсcombe *et al.* (2009) сообщили, что отрицательная ионизация воздуха предотвращает большинство случаев передачи туберкулеза воздушно-капельным путем, обнаруживаемых при взятии проб у морских свинок. Заряженные биоаэрозоли, тем не менее, подняли вопрос о том, увеличат ли они свое отложение в легких (Jeffers, 2007). Мы

обратите внимание, что эта технология не включена ни в какие рекомендации CDC или НТМ. Возможно, что технологии, внедряемые в окружающую среду, могут иметь неожиданные результаты, которые могут либо способствовать очистке воздуха, либо потенциально спровоцировать нежелательные побочные эффекты. Это является одной из основных проблем при тестировании действия и эффективности воздухоочистительных устройств, поскольку различные человеческие факторы и факторы окружающей среды могут повлиять на результаты тестирования.

Пассивные системы. Пассивные системы были разработаны для очистки воздуха в помещениях за счет удаления загрязняющих веществ, контактирующих с поверхностями зданий. Покрытия, такие как антимикробные материалы, наночастицы и фотокаталитическое окисление (PCO), могут наноситься на поверхности стен для выполнения пассивной дезактивации при взаимодействии с загрязнителями или воздухом в помещении. PCO использовался на настенных плитках в хирургических кабинетах в Японии (Fujishima, Hashimoto and Watanabe, 1999), где количество бактерий на плитках снизилось до незначительного уровня за 1 час, а количество воздуха в помещении значительно снизилось. Технология пассивных систем огу демонстрирует пассивный путь дезактивации биоаэрозолей, который полностью отличается от подхода к очистке воздуха и требует турбулентного перемешивания воздуха для увеличения частоты контакта биоаэрозолей с поверхностями.

11.6 Заключение

В этой главе мы показали, что наука и технология аэрозолей продвинули вперед наше понимание биоаэрозолей в больничной среде и контроль за ними. Различные дисциплины, факторы и технологические возможности могут повлиять на попытки снизить риски заражения. Достижения науки и технологии в области аэрозолей обеспечат появление новых подходов и применений в будущем. Применение новых технологий и практик в больницах должно подкрепляться надежными лабораторными и клиническими данными, а также должно учитывать преимущества для пациентов и проблемы затрат. Закупки, эксплуатация, техническое обслуживание и этические вопросы должны оцениваться на начальных этапах. Кроме того, при оценке новых технологий для клинического применения, заявки должны подаваться в соответствии с руководящими принципами промышленности и сектора здравоохранения. Эффективность различных систем /устройств очистки воздуха зависит не только от конкретной используемой технологии, но и от различных конструкций изделий и факторов окружающей среды, таких как источник выбросов биоаэрозоля, перемешивание воздуха, характер воздушного потока, влажность, время воздействия, деятельность жильцов, объем закрытого пространства и типы и режим работы систем ОВКВ. Разработка и валидация технологии и продукта должны учитывать все эти требования и влияющие факторы для достижения конечной цели защиты общественного здоровья.

Список литературы.

- Абдул Салам, З.Х., Карлин, Р.Б., Линг, М.Л. и Янг, К.С. (2010) Влияние портативных компьютеров влияние высокоэффективных сажевых фильтров на частоту инвазивного аспергиллеза в крупной больнице неотложной помощи третичного звена. *Американский журнал инфекционного контроля*, 38(4), e1 -e7.
- AIA (2001) *Руководство по проектированию и строительству больниц и медицинских учреждений-связи*, Издательство Американского института архитекторов, Вашингтон, Округ Колумбия.
- Асфур, О.С. и Гади, М.Б. (2007) Сравнение CFD и сетевых моделей для прогнозирования ветровой вентиляции в зданиях. *Здание и окружающая среда*, 42 (12), 4079 -4085.

- ASHRAE (1999) Медицинские учреждения, в сборнике *Справочник ASHRAE: применение систем кондиционирования воздуха, развлечения-материалы*, Американское общество инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха, Атланта. Брокус Х., Баллинг К.Д. и Джеппесен Д. (2006) Влияние движений на загрязняющие вещества транспортировка в операционной. *Воздух в помещении*, 16(5), 356-372.
- Руководство CDC (1994) по предотвращению передачи микобактерий туберкулеза в учреждениях здравоохранения. *MMWR. Еженедельный отчет о заболеваемости и смертности*, 43, 1-17.
- Руководство CDC (2003) по борьбе с инфекциями из окружающей среды в медицинских учреждениях. *MMWR. Еженедельный отчет о заболеваемости и смертности*, 52(RR10), 1-42.
- CDC (2004) Руководство по профилактике пневмонии, связанной с оказанием медицинской помощи, Департамент Здравоохранения и *MM рт. ст. Еженедельный отчет о заболеваемости и смертности*, 53(RR03), 1-36.
- Чоу Т., Лин З. и Бай У. (2006) Комплексное влияние положения медицинской лампы и разницы-скорость выпуска термоблока для обеспечения сверхчистой вентиляции в операционной. *Внутри помещений и за их пределами*, 15(4), 315-331. Чоу Т. и Янг Х. (2005) Эффективность вентиляции в операционной против проникновения воздуха-переносимая инфекция: численное исследование *Журнал госпитальной инфекции*, 59(2), 138-147.
- Министерство здравоохранения (2007а) *Технический меморандум по здравоохранению HTM 03-01: Специализированный Вентиляция для медицинских помещений - часть А: проектирование и валидация*, TSO, Норвич.
- Министерство здравоохранения (2007б) *Технический меморандум по здравоохранению 03-01: Специализированная вентиляция-документация для медицинских учреждений - Часть В: Оперативное управление и проверка эффективности*, TSO, Норвич. Дхаран, С. и Питтет, Д. (2002) Контроль окружающей среды в операционных. *Журнал Госпитальная инфекция*, 51(2), 79-84.
- Дюсель, Дж., Фабри Дж. и Николе Л. (2002) *Профилактика внутрибольничных инфекций - Практическое руководство*, Издательство ВОЗ, Женева.
- Эскомб А.Р., Мур Д.А., Гилман Р.Х. *et al.* (2009) Ультрафиолетовый свет в верхней комнате и отрицательная ионизация воздуха для предотвращения передачи туберкулеза. *PLoS Medicine*, 6(3), e1000043.
- First, M.W., Nardell, E.A., Chaisson, W. и Riley, R. (1999a) Рекомендации по применению-применение ультрафиолетового бактерицидного облучения верхних помещений для предотвращения передачи инфекции воздушно-капельным путем - Часть I: основные принципы. *Сделки ASHRAE*, 105, 869-876. First, M.W., Nardell, E.A., Chaisson, W. и Riley, R. (1999b) Рекомендации по применению-применение ультрафиолетового бактерицидного облучения верхних помещений для предотвращения передачи инфекции воздушно-капельным путем - Часть II: руководство по проектированию и эксплуатации. *Транзакции ASHRAE*, 105, 877-887.
- Фудзисима А., Хасимото К. и Ватанабэ Т. (1999) *ТiO₂ Фотокатализ: Основы и приложения*, ВКС, Токио.
- Голдберг Л.Дж. (1971) Военно-морская лаборатория биомедицинских исследований, запрограммированная среда, аэрозольная установка. *Прикладная микробиология*, 21(2), 244-252.
- Голдберг Л., Уоткинс Х., Бурке Э. и Шатины М. (1958) Использование вращающегося барабана для изучения аэрозолей в течение длительных периодов времени. *Американский журнал гигиены*, 68(1), 85-93.
- Хендерсон, Д.В. (1952) Аппарат для изучения воздушно-капельной инфекции. *Журнал Гигиены*, 50(1), 53-68.

- Хиндс, У.К. (1999) *Аэрозольная технология: свойства, поведение и измерение концентрации воздуха-переносимые частицы: свойства, поведение и измерение переносимых по воздуху частиц*, Wiley- Interscience, Нью-Йорк. Хо, А.С., Сун, Дж.Дж. и Чан-Юнг, М. (2003) Вспышка тяжелого острого респираторного синдрома
- Среди работников больницы в муниципальной больнице в Гонконге. *Анналы внутренней медицины*, **139**(7), 564-567. Хуан, Х.К., Пан, Ю.Л., Стивен, К.Х. *et al.* (2008) измерение в режиме реального времени из двойной-длина волны лазерно-индуцированной флуоресценции отдельных аэрозольных частиц. *Оптик Экспресс*, **16** (21), 16523 -16528. Хусейн С., Александр Б.Д., Муньос П. *et al.* (2003) Условно-патогенная мицелиальная грибковая инфекция-заболевания у реципиентов трансплантата органов: растущее значение мицелиальных грибов, не относящихся к *Aspergillus*. *Клинические инфекционные заболевания*, **37**(2), 221-229. МКРЗ (1994) Модель дыхательных путей человека для радиологической защиты. Отчет рабочей группы Международной комиссии по радиологической защите. *Анналы МКРЗ*, **24**(1-3), 1 - 482. Ип, М., Тан, Дж.У., Хуэй, Д.С. *et al.* (2007) Воздушный поток и распространение капель вокруг кислородных масок имитационная модель для исследований инфекционного контроля. *Американский журнал инфекционного контроля*, **35**(10), 684 - 689. Джефферс Д. (2007) Моделирование и анализ не подтверждают гипотезу о том, что зарядка с помощью короны линии электропередачи увеличивает отложение частиц в легких, переносимых по воздуху. *Радиационная защита Дозиметрия*, **123** (2), 257-261.
- Керр К.Г., Бетге К.Б., Дин С.Г. *et al.* (2006) Ионизация воздуха и колонизация / инфекция с устойчивым к метициллину золотистым стафилококком и видами *acinetobacter* в отделении интенсивной терапии. *Интенсивная терапия*, **32**(2), 315-317. Ковальски, У.Дж. (2012) *Контроль инфекций, передаваемых воздушно-капельным путем, в больницах*, CRC Press, Флорида. Ландрин А., Биссерри А. и Кац Г. (2005) Мониторинг отбора проб воздуха в операционных: может ли подсчет частиц заменить микробиологический отбор проб? *Журнал госпитальной инфекции*, **61**(1), 27 -29.
- Льюнг М. и Чан А. Х.С. (2006) Контроль и управление качеством воздуха в помещениях больниц. *Медицинский научный монитор*, **12**(3), 17-23.
- Лим Т., Чо Дж. и Ким Б.С. (2011) Прогнозы и измерения влияния стека на передачу вируса воздушно-капельным путем внутри помещений в высотном здании больницы. *Здание и окружающая среда*, **46**(12), 2413 - 2424.
- Листер, Дж. (2003) Опыт PFI, Голоса с передовой, Отчет PFI для UNI-SON.
- Лю, Х. и Чжай, З. (2007) Определение подходящих моделей CFD для моделирования аэрозоля транспортировка частиц и капель в помещении. *Внутренняя и искусственная среда*, **16**(4), 322-330.
- Макканнелл, Т., Умшайд, К. А., Агарвал, Р. К. *et al.*: инфекционный контроль в сфере здравоохранения Консультативный комитет по практике (НЦРАС) (2011) Руководство по профилактике и борьбе со вспышкой норовирусного гастроэнтерита в медицинских учреждениях, CDC, Атланта, Джорджия (Онлайн), <http://www.cdc.gov/hicpac/norovirus/norovirus-references.html> (последнее обращение к 8 августа 2013 г.).
- Марк Д., Винсент Дж. Х., Линч Г. *et al.*, (1990) Разработка статического пробоотборника для измерения содержания вдыхаемого аэрозоля в окружающей атмосфере с особым указанием ПАУ. Отчет об исследовании ТМ/90/06, МОМ, стр. 1-59.

- Мазумдар, С., Инь, Ю., Гити, А. *et al.* (2010) Воздействие движущихся объектов на загрязняющие вещества распределение концентрации в стационарной палате с принудительной вентиляцией. *Исследования HVAC и R*, **16**(5), 545-556.
- Мемарзаде Ф. и Мэннинг А.П. (2002) Сравнение систем вентиляции операционной-средства защиты места операции. *Транзакции ASHRAE*, **108**(2), 3-15.
- Миллер С.Л., Эрнандес М., Феннелли К. *et al.* (2002) Эффективность ультрафиолетового облучения в борьбе с распространением туберкулеза, Отчет NTIS PB2003-103816 NIOSH, октябрь, стр. 1-80.
- Никас М. и Миллер С.Л. (1999) Многозональная модельная оценка эффективности лечения верхних-ультрафиолетовое бактерицидное облучение воздуха в помещении. *Прикладная гигиена труда и окружающей среды*.
- Панкхерст Л., Тейлор Дж., Клуتمان-Грин Э.А. *et al.* (2011) Может очищать помещение от частиц-можно ли использовать в качестве средства инфекционного контроля в операционных больниц? *Внутри помещений и за их пределами Окружающая среда*, **21**, 381-391. doi: 10.1177/1420326X11409467
- Парриента, Д., Моравска, Л., Джонсон, Г.Р. *et al.* (2011) Теоретический анализ движения и испарения выдыхаемых дыхательных капель смешанного состава. *Журнал Наука об аэрозолях*, **42**(1), 1-10.
- Паскуарелла К., Пиццурра О. и Савино, А. (2000) Индекс микробного загрязнения воздуха-*Журнал госпитальной инфекции*, **46**(4), 241-256.
- Руи З., Гуанбэй Т. и Джихонг Л. (2008) Исследование стратегий контроля биологических загрязнений-при различных моделях вентиляции в операционной больницы. *Здание и окружающая среда*, **43**(5), 793-803.
- Шепард, С.Дж., Беттс, К.Б., Смит, К.Ф. *et al.* (2010) Влияние отрицательных аэроионов на вероятность бактериального загрязнения пластикового медицинского оборудования. *Инфекционные заболевания ВМС облегчают*, **10**, 92.
- Шивапракасам В., Лин Х.Б., Хьюстон А.Л. и Эверсол Дж.Д. (2011) Спектральные характеристики-зации биологических частиц аэрозоля, используя две длины волны возбуждаемых лазерно-индуцированной флуоресценции- rescence и упругого рассеяния измерений. *Оптик-Экспресс*, **19** (7), 6191-6208.
- Сосновски, Т. Р. (2011) Важность геометрии дыхательных путей и изменения дыхательных параметров-способность к отложению частиц в дыхательных путях человека. *Журнал грудных заболеваний*, **3**(3), 153- 155.
- Тан, Дж.У. (2009) Влияние параметров окружающей среды на выживаемость инфицированных воздушно-капельным путем-опасные агенты. *Журнал интерфейса Королевского общества*, (6), S737 - S746.
- Тан, Дж.У., Имс, И., Ли, Ю. *et al.* (2005) Движение по открыванию двери потенциально может привести к преходящее расстройство в отрицательном-давление изоляции условия: важность вихревой-ность и выталкивающей силы воздуха. *Журнал госпитальной инфекции*, **61**(4), 283-286.
- Ульрих Р.С. (2006) Архитектура здравоохранения, основанная на фактических данных. *Ланцет*, **368**, S38 - S39.
- Вебер В. (1979) Болезни людей, связанные с голубями. Индианаполис, Индиана: борьба с птицами.
- Материалы семинаров, документ 21 (онлайн), <http://digitalcommons.unl.edu/icwdmbird> контроль / 21 (последнее обращение 8 августа 2013 г.).
- ВОЗ (2004) Система оценки риска атипичной пневмонии и обеспечения готовности, Издательство ВОЗ, Женева.
- ВОЗ (2005) Каталог ВОЗ для плана обеспечения готовности к пандемии гриппа , Издательство ВОЗ, Женева.
- ВОЗ (2009а) Грипп (сезонный). Информационный бюллетень № 211, ВОЗ, Женева (онлайн), <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs211/en/index.html> (последнее обращение 8 августа 2013 г.).

- ВОЗ (2009b) *Естественная вентиляция для инфекционного контроля в медицинских учреждениях*, ВОЗ Издательство, Женева.
- ВОЗ (2011) *Доклад о бремени эндемичных инфекций, связанных со здравоохранением, в мире. - широкий, чистый уход - более безопасный уход, систематический обзор литературы*, Издательство ВОЗ.
- ВОЗ (2012) *Растущая угроза устойчивости к противомикробным препаратам: варианты действий*, ВОЗ Пресса, Женева.
- Уилсон, А. П.Р. и Риджуэй, Г.Л. (2006) Сокращение внутрибольничной инфекции за счет дизайна: новая больница Университетского колледжа Лондона. *Журнал госпитальной инфекции.*, **62**(3), 264- 269. Ву Ю.,
- Чжэн Ю. и Чу К. (2011) Исследование скорости удаления загрязняющих веществ и вентиляции- эффективность вентиляции при различных конструкциях вентиляционных систем ОВКВ в операционной. *Передовые научные письма*, **(6)**, 2361 - 2368.
- Йик, Ф. В.Х. и Пауэлл, Г. (2003) Обзор конструкции вентиляции изолятора и оценка- управление с помощью симуляции *Внутренняя и искусственная среда*, **12**(1- 2), 73- 79.
- Чжао, Б., Ян, К., Чен, С. *et al.* (2009) Сколько частиц, находящихся в воздухе, выбрасывается медсестрой достигнет зоны дыхания / поверхности тела пациента в условиях защиты полости рта в одноместных палатах 5-го класса ISO? - численный анализ. *Наука и технология в области аэрозолей*, **43**(10), 990-1005.
- Зун В., Ван дер Хейден М., Луманс М. и Хенсен Дж. (2010) О применимости показателя ламинарного потока при выборе хирургического освещения. *Здание и окружающая среда*, **45**(9), 1976-1983.

Синтез наноструктурированных материалов в газовой фазе

Питер В. Пихица и Мансу Чой

*Отделение многомасштабного механического проектирования WCU, Школа механики и аэрокосмической промышленности
Инженерия, Сеульский национальный университет, Южная Корея*

12.1 Введение

Наноструктурированные материалы, изготовленные из собранных наночастиц, могут проявлять различные свойства, недостижимые в обычных однородных сыпучих материалах. Уровни энергии электронов, плазменные состояния, магнитные состояния и так далее могут быть очень специфичными для отдельных наночастиц. Когда наночастицы собираются в материал, они могут представлять собой искусственные объемные материалы с интересными свойствами. Первыми среди них являются транспортные и пропускающие свойства, будь то теплопередача, электромагнитные волны, спиновые волны или перенос электрического заряда. Транспортные свойства могут быть очень чувствительными к окружающей среде из-за систем интерфейсов и границ зерен, особенно для наночастиц, расположенных в низкоразмерных цепочечных структурах. Другие свойства включают термодинамические свойства: способность к зарядке, как в литий-литиевых батареях; суперпарамагнитные свойства; эффекты переноса излучения, как в солнечном элементе; каталитическая активность; и так далее.

Тогда возникают два технических вопроса: как создать наночастицы с желаемыми свойствами и как организовать их в полезные структуры. Разработано огромное количество методов получения наноструктурированных материалов, и иногда две задачи могут быть решены в одностадийном процессе синтеза, в ходе которого наночастицы выстраиваются в такие структуры. Отдельные наночастицы могут быть получены практически с помощью любого высокоэнергетического химического или физического процесса, включая влажную химию, взаимодействие твердое тело с твердым телом, нагрев, плазму, электронный пучок или ионное облучение, лазерную абляцию и пламя. Как правило, различные процессы зарядки

а быстрое прекращение роста кластеров из-за быстрого тушения предотвращает коалесценцию и созревание наночастиц в диапазоне микрометровых размеров.

В этой главе мы рассмотрим несколько методов синтеза наноструктур, некоторые из которых используют особые физические эффекты, а также полезные свойства, которые могут проявлять синтезированные материалы.

12.2 Синтез на основе аэрозоля

Одним из наиболее популярных методов синтеза наноструктурированных материалов является аэрозольный синтез наночастиц. Недавний обзор можно найти в работе Schmidt-Ott (2011).

Аэрозольные методы имеют много преимуществ: они чище, чем химический раствор; они считаются легко и быстро контролируются расходом газа; и они легко доступны для диагностики на месте. Потоком наночастиц можно манипулировать и направлять с помощью электрических, магнитных или других полей для упорядочивания / сборки наночастиц в полезные структуры. Кроме того, газы могут быть превращены в плазму либо в пламени, либо с помощью тлеющих и искровых разрядов. Прозрачность газового потока позволяет получить доступ к зоне реакции лазерным лучам. Быстрая закалка или прямая конденсация в твердую фазу обеспечивают точное нанесение покрытия. Характерная длительность в миллисекундах обеспечивает самую высокую скорость образования наночастиц, что полезно для нанесения и массового производства.

Давайте рассмотрим некоторые методы и интересные эффекты, которые, хотя иногда и находятся вне основного направления исследований, могут подчеркнуть потенциал синтеза на основе аэрозолей для получения наноструктурированных материалов. В отличие от Шмидта-Отта (2011), который концентрируется только на синтезе отдельных наночастиц, мы рассмотрим здесь некоторые методы сборки и подчеркнем физические эффекты, обнаруживаемые в собранных наноструктурированных материалах.

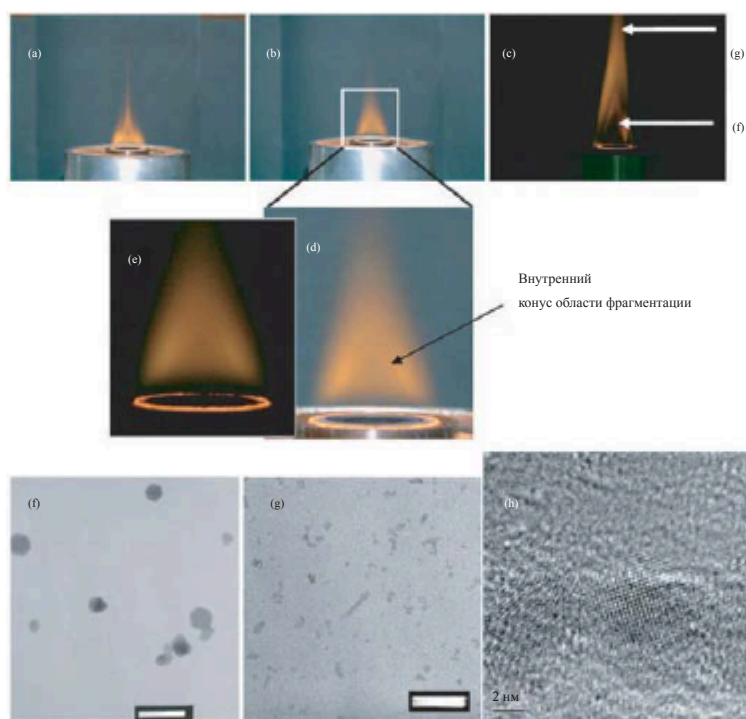
12.3 Синтез в пламени

Наночастицы часто образуются в пламени; сажа, образованная углеродными наночастицами различной морфологии и степени агломерации, является хорошо известным примером. Другим является образование оксидов металлов. Определенные свойства наночастиц оксида металла, такие как суперпарамагнетизм и каталитическая активность, решающим образом зависят от уменьшения размера. Среди методов получения наночастиц с регулируемым размером газозофазный способ с использованием пламени имеет определенные преимущества, одно из которых заключается в том, что при нем можно непрерывно получать очень чистые наночастицы металл-оксид (Працинис, 1998). Диффузионное пламя, в отличие от предварительно смешанного пламени, обеспечивает возможность точного регулирования среды роста с помощью скорости газа и конфигурации горелки. Предшественники, такие как хлориды металлов и ацетилацетонаты металлов, сжигаемые в пламени газами-носителями, окисляются с образованием наночастиц оксида металла. Обычно это приводит к постепенному и хорошо контролируемому увеличению размера наночастиц по мере удаления от края горелки. $\bar{r}$ увеличивается. Однако даже в этой простой конфигурации было обнаружено, что наночастицы оксида железа III, образованные газозофазным путем из железосодержащего предшественника ацетилацетоната железа, лацетоната железа в кислородно-водородном пламени, которые первоначально увеличивались до размера 20 нм, резко трансформируются в наночастицы размером 3 нм по мере увеличения расстояния от края горелки., (Yang *et al.*, 2003). Было высказано предположение, что механизм фрагментации наночастиц может быть термическая нестабильность, вызванная термически индуцированным фазовым переходом из метастабильной фазы в стабильную фазу оксида железа (Yang *et al.*, 2003). Если бы это было так,

однако температура кислородно-водородного пламени сыграла бы решающую роль, и это явление зависело бы от конкретного материала, таким образом, фазовое превращение работает только для оксида железа. Тем не менее, после дальнейших экспериментов по пламенному синтезу наночастиц оксида олова (SnO_2) из тетраоксида олова, введенных в конус кислородно-водородного пламени

выявив то же явление фрагментации, объяснение того, что фазовое преобразование является приводным механизмом, было поставлено под сомнение (Пихица *et al.*, 2007). Кроме того, оказалось, что поток водорода, а не температура пламени, был основным источником контроля фрагментации наночастиц обоих оксидов (рис. 12.1).

Естественно подозревать, что водород ответственен за фрагментацию наночастиц. Действительно, известно, что удаление кислорода с поверхности в результате восстановления водорода приводит к образованию на поверхности оксидов гофрирования и резьбы (например, для титана) и даже фрагментации (известно для синего оксида вольфрама). Причиной нестабильности поверхности является поверхностное раз- слияние избыточных атомов металла, которые имеют тенденцию собираться вместе и заканчивать поверхность



Фотографические изображения конусов пламени и просвечивающая электронная микроскопия **Рисунок 12.1** (ПЭМ) изображения наночастиц оксида железа. (а) внешний вид конуса пламени в случае отсутствия фрагментации при соотношении водород: кислород 3:4 при 1345 °С. (б) внешний вид конус пламени в случае фрагментации при соотношении водород : кислород 4 : 5 при 1650 °С. (с) Внешний вид конуса пламени в случае фрагментации при соотношении водород : кислород 14 при 1100°С. (значительно уменьшенный). (d, e) Увеличенная часть (с), снятая соответственно со вспышкой и без нее. Четко выделена область фрагментации. (f) ПЭМ-изображение наночастиц оксида железа, собранных внутри конуса в (с) из области при $z = 20$ мм. (g) За пределами области конуса на $z = 100$ мм (области отбора проб показаны стрелками в (с), шкала штриха равна 50 нм). (h) ПЭМ-изображение фрагментированных частиц с высоким разрешением из (g). Перепечатано с разрешения Pikhitsa *et al.* (2007). Авторское право © 2007, Американский институт физики. Цветную версию смотрите в разделе "Табличка".

нанооксид. Вырезание в результате удаления кислорода невозможно в местах, где в избытке присутствуют атомы металла, и из-за неравномерного распределения металла и областей, богатых кислородом, после механической деформации развивается нестабильность поверхности. Затем крошечные наночастицы начинают отслаиваться от поверхности, и в конечном итоге вся первичная крупная наночастица превращается в их множество. Этот пример (Пихица *et al.*, 2007) демонстрирует, что даже при простой конфигурации пламени можно столкнуться с неожиданными и не зависящими от материала эффектами, которые могут быть использованы для контроля размера наночастиц помимо эффекта стандартного синтеза в пламени (Вемури, Працинис и Кибби, 1997; Телеки *et al.*, 2009).

Более сложный синтез пламени включает в себя гетерогенную структуру пламени, приводит к нанесению покрытия на наночастицы для сохранения и защиты их свойств от воздействия агрессивной среды (Телеки, 2009). Синтез композитных наночастиц в режиме нанесения покрытий привлекает большое внимание, поскольку композитные наночастицы могут не только проявлять уникальные свойства, которые нельзя ожидать от отдельных компонентов композитов, но также могут потребоваться для обеспечения стабильности частиц.

В частности, композитные наночастицы с покрытием продемонстрировали улучшенные свойства по сравнению с частицами без покрытия. Например, сообщалось о более эффективной фотолюминесценции (ФЛ) и стабильности квантовых точек CdSe с кремнеземным покрытием (Selvan, Tan, and Ying, 2005), а частиц магнетита с кремнеземным покрытием (Teleki, 2009) было показано, что их легче обнаружить.

et al

сохраняется в органических и водных растворах (Santra *et al.*, 2001). Послойная сборка *et al*

железо, покрытое кремнеземом, O_4 была предложена наночастица, и магнитные частицы с покрытием показали снижение совместного переключения намагниченности между частицами из-за барьерного эффекта слоя кремнезема (Алиев *et al.*, 1999). Специфический суперпарамагнетизм мельчайшего железа O

3 4

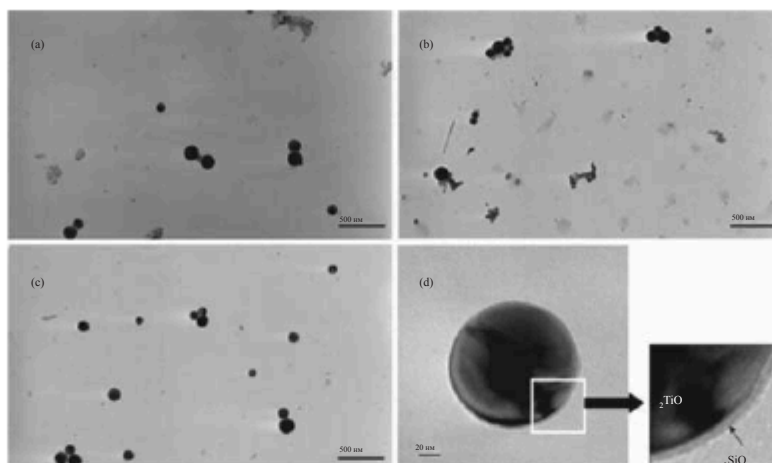
наночастицы с покрытием полностью сохраняют магнетизм чистых наночастиц оксида железа. Простой метод нанесения покрытия пламенем *in situ* был разработан путем разработки нового типа проточной горелки с диффузионным пламенем со скользящим узлом (рис. 12.2).

Было показано, что скользящий узел очень эффективен при нахождении положения, в котором исходный материал для слоя покрытия должен соприкасаться с частицами сердцевин. $SiCl_4$ был введен в установку нанесения покрытия и $TiCl_4$ был введен в центральное сопло в качестве основного предшественника. Для того, чтобы определить правильное положение узла нанесения покрытия относительно поверхности горелки, частицы собирали при $h=160$ мм с помощью термофоретического устройства для отбора проб путем смены скользящего узла нанесения покрытия в различных вертикальных положениях (h_v). Затем их исследовали с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ТЭМ). Когда покрытие полностью был размещен на низкой позиции (при $h = 5$ и 45 мм) (рис. 12.3,б), крупные агрегаты и сферические частицы

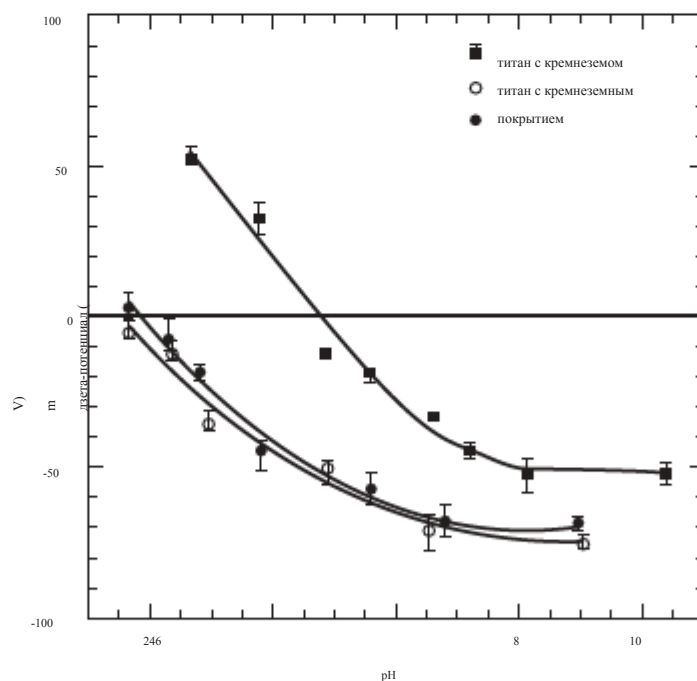
совместное наблюдение и анализ методом энергодисперсной спектроскопии (EDS) показали, что они были агрегатами SiO и TiO сферами. В нижних положениях $h = 5$ и 45 мм разница

сплавленный $SiCl_4$ пар, вероятно, образовывал небольшие агрегаты в результате химической реакции из-за высоких температур пламени при такой низкой высоте пламени. Сдвинув блок нанесения покрытия вертикально в еще более высокое положение на высоте $h_v = 80$ мм, можно было предотвратить образование независимых вмятин, частиц, поскольку температура пламени снижается в нижележащей области. Как показано на рисунке 12.3с, были получены наночастицы титана, покрытые кремнеземом. Увеличенное ТЕМ-изображение подтвердило, что поверхность сферической наночастицы TiO была полностью покрыта тонким слоем SiO_2 толщиной около $2,4$ нм (рис. 12.3д).

Подавление образования агрегатов кремнезема, где $h_v=80$ мм дважды проверяли в ТЕМ по порошку, собранному в кварцевой трубке с водяным охлаждением. Дополнительные эксперименты, где только Сикл вводят в блок покрытия при $H = 80$ мм, без сердечника частица- предшественник $TiCl_4$, также был проведен для того, чтобы подтвердить подавление образования кремнезема

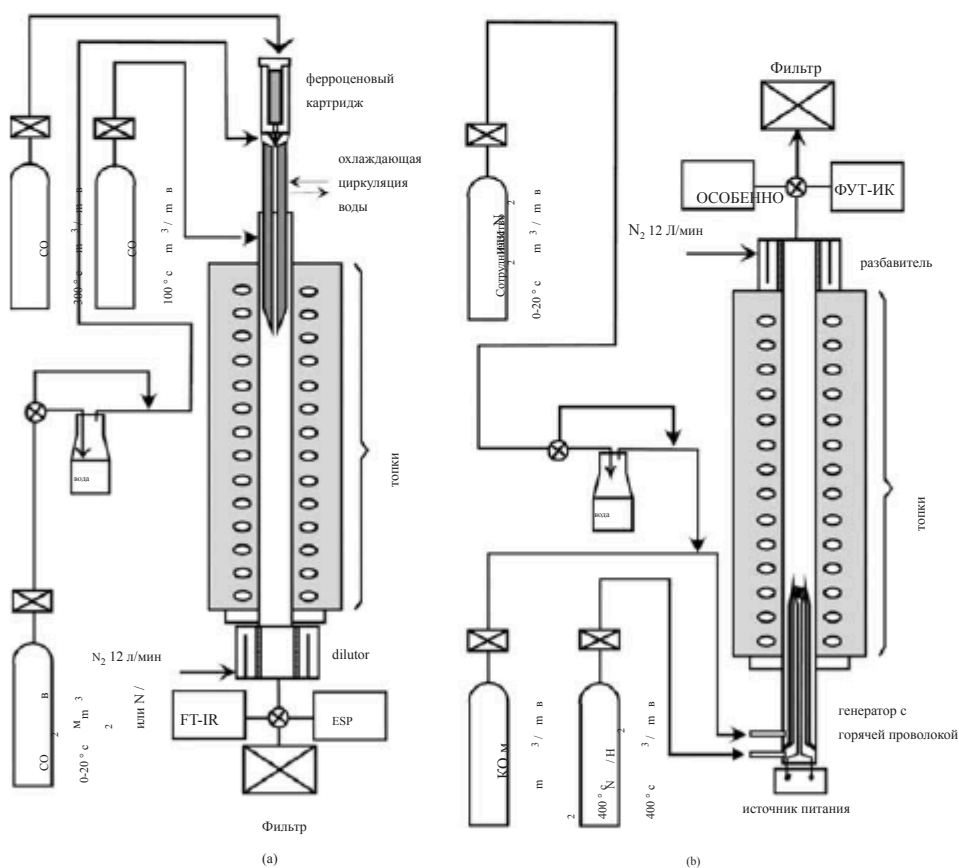


ПЭМ-изображения наночастиц, собранных в различных положениях скользящего элемента: (a) $h=5$ мм, $h=160$ мм; (b) $h=45$ мм, $h=160$ мм; (c) $h=80$ мм, $h=160$ мм. (d) Увеличенное ТЕМ-изображение SiO_2 -покрытый TiO_2 наночастица, $h=80$ мм, $h=160$ мм. Воспроизведено с разрешения Sheen et al. (2009). Авторское право © 2009, Springer Science+Business Media B.V.



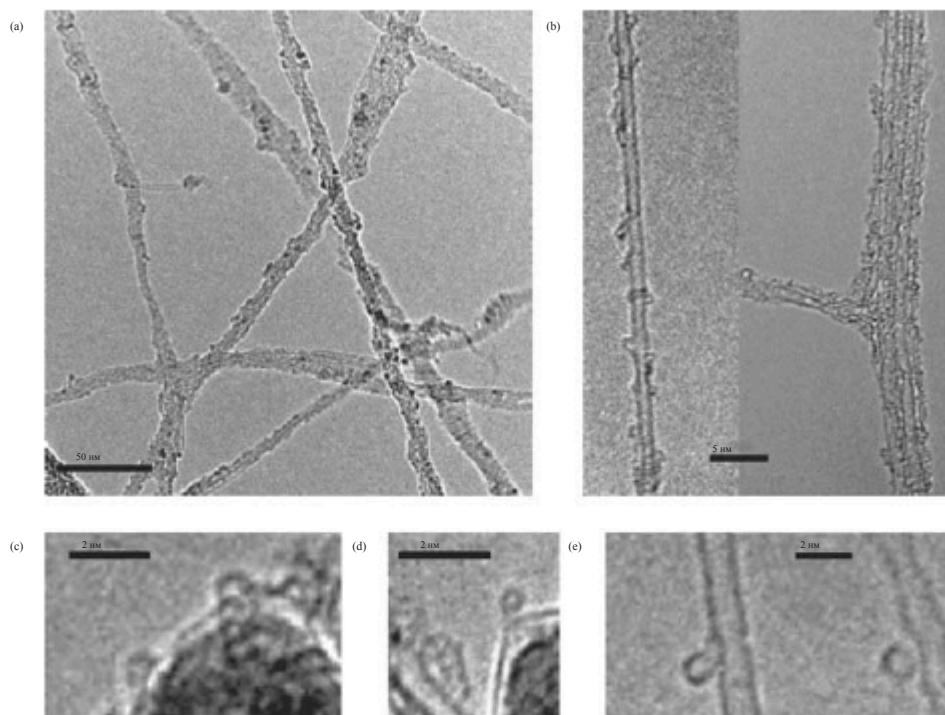
наночастицы;
Рисунок 12.4 Дзета-потенциальные значения SiO_2 , TiO_2 , и SiO_2 -покрытый TiO_2 $h=80$ мм, $h=160$ мм. Воспроизведено с разрешения Sheen et al. (2009). Авторское право © 2009, Springer Science+Business Media B.V.

Примером наноструктурированного углеродного материала, получаемого в результате процесса "вечного покрытия", является выращивание углеродных нанотрубок на основе аэрозоля из газообразных углеводородов, где первые полученные наночастицы металла железа катализируют рост одностенных углеродных нанотрубок с их поверхности. Каждая наночастица железа остается в головке растущей нанотрубки, и нанотрубка образует растущий длинный хвост (Насибулин *et al.*, 2007). Радиус наночастицы определяет радиус нанотрубки. Однако динамика стационарного синтеза вносит некоторые специфические неоднородности в процесс выращивания нанотрубки. Был обнаружен новый гибридный материал, который объединяет фуллерены и одностенные нанотрубки (ОУНТ) в единую структуру, в которой фуллерены ковалентно связаны с внешней поверхностью ОУНТ (Насибулин *et al.*, 2007). Эти функционализированные фуллереном ОУНТ, называемые "нанопучками", были селективно синтезированы двумя различными одностадийными непрерывными методами, в ходе которых фуллерены образовывались на частицах катализатора на основе железа вместе с ОУНТ в процессе СОВМЕСТНОГО диспропорционирования. Автоэмиссионные характеристики нанопластин предполагают, что они могут обладать преимущественными свойствами по сравнению с ОУНТ или фуллеренами отдельно или в их несвязанных конфигурациях. Нанопластинки были синтезированы в двух различных реакторах непрерывного действия с аэрозолями (плавающий катализатор) с использованием частиц, выращенных на месте *in situ* в результате разложения ферроцена из паров и предварительно приготовленного железного катализатора частицы образуются с помощью генератора горячей проволоки (HWG) (рис. 12.5).



Схемы экспериментальных установок: (а) ферроценовый реактор и (б) HWG Рисунок

12.5 метод. Адаптировано с разрешения Насибулина *et al.* (2007).



ПЭМ-наблюдение структур нанопудры. (а) ПЭМ-изображение а при малом увеличении Рисунок 12.6 образец, показывающий ОУНТ, по-видимому, покрытый аморфным углеродом. (b) Изображения образца с промежуточным увеличением, показывающие наличие сферических структур на поверхностях ОУНТ. (с-е) ПЭМ-изображения высокого разрешения, показывающие фуллерены, расположенные на частице катализатора, содержащей железо, (с) и на слое углерода, покрывающем частицу катализатора (d), и нанопластины, в которых фуллерен объединен с SWNT (е, слева) и прикреплен к поверхности SWNT (е, справа). Адаптировано с разрешения Насибулина et al. (2007).

ПЭМ-изображения продукта при малом увеличении позволяют предположить, что большинство синтезированных ОУН имеют "аморфное покрытие" (рис. 12.6а). Однако тщательные исследования (рис. 12.6b - e) показывают, что большая часть покрытия на самом деле состоит из фуллеренов. Их сферическая природа была подтверждена наклоном образцов в пределах ТЕМ. Статистические измерения сферических ячеек на поверхностях ОУНТ, определенные по изображениям ПЭМ с высоким разрешением, показывают, что большинство измеренных размеров можно отнести к наличию C_{60} .

Интересно, что распределение фулл. самый маленький из возможных додекаэдров. Было обнаружено, что ключевым параметром, необходимым для синтеза наночастиц в реакторах обоих типов, является наличие следовых концентраций паров Но и CO_2 , демонстрируя тем самым общность влияния этих травителей на каталитическое совместное образование фуллеренаиSWNT. В попытке контролировать степень покрытия SWNT фуллеренами (т.е. степень функционализации SWNT) варьировали температуру реактора, как и концентрации водяного пара и диоксида углерода. Было обнаружено, что эти параметры заметно влияли на количество фуллеренов на поверхностях ОУНТ. Введение Но и СО в ферроценовый реактор показало, что оптимальный 2 концентрации реагентов составляли от 45 до 245 частей на миллион для воды и от 2000 до

6000 промилле для CO_2 , и самая высокая достигнутая плотность фуллеренов составляла более одного фуллерена на нанометр, при этом фуллерены располагались непрерывным потоком вдоль SWNT.

12.4 Пламенный и лазерный синтез

Использование дополнительных внешних источников энергии, таких как электрический разряд через пламя (Вемури, Працинис и Кибби, 1997) и нагрев растущих наночастиц *in situ* с лазером это также приводит к модификации наночастиц. Мощный инфракрасный CO-лазер можно использовать на пламени для контроля морфологии, размера и кристалличности наночастиц. Одним из примеров является преобразование морфологии и размера наночастиц SiO_2 (Lee and Choi, 2000). Характерное время коалесценции или спекания сильно зависит от температуры и соответствует выражению Аррениуса; то есть экспоненциальное уменьшение характерного времени спекания с повышением температуры частиц, в то время как характерное время столкновения для свободномолекулярного режима уменьшается в соответствии с $1/T^{1/2}$, где T - температура наночастиц. Следовательно, характеристическое время спекания можно регулировать практически независимо от времени столкновения за счет быстрого нагрева агрегированных наночастиц. Ли и Чой (2000) предприняли попытку контролировать характерное время спекания с помощью инфракрасного излучения CO-лазера.

воздействие на агрегированные наночастицы, образующиеся в пламени, как показано на рис. 12.7. Это изменило морфологию наночастиц, от цепеобразных агрегатов до более сферических форм. Агрегаты, облучаемые мощным непрерывным лазерным лучом CO, можно нагревать до высокой температуры, а затем спекать, чтобы получить более сферические наночастицы, благодаря повышенной скорости спекания.

Поскольку сферические наночастицы имеют гораздо меньшие поперечные сечения при столкновении, чем агрегаты, эквивалентные по объему (Працинис, 1998), можно ожидать гораздо более медленного роста. В результате, размер преобразованных сферических наночастиц, образующихся в результате облучения CO лазером, должен стать меньше, чем у агрегатов, которые первоначально существовали в пламени. Таким образом, синтез более мелких сферических наночастиц может быть достигнут с помощью лазерного облучения агрегатов, образующихся в пламени. Охлажденную подложку можно поместить непосредственно над точкой лазерного облучения для осаждения преобразованных наночастиц.

Таким образом, был предложен новый подход к контролю размера и морфологии генерируемых пламенем наночастиц с использованием лазерного облучения (Lee and Choi, 2000), а эффекты лазерного облучения при пламенном синтезе наночастиц были подтверждены измерениями светорассеяния и наблюдением за фотографиями ПЭМ локально захваченных наночастиц. В зависимости от высоты облучения пучка CO-лазера в пламени могут быть обнаружены существенно отличающиеся механизмы. При низкой высоте облучения эффект образования частиц становится доминирующим, из-за поглощения мощности лазера газом. Это приводит к увеличению интенсивности рассеяния света ионно-ионного лазера и подтверждается наблюдениями ПЭМ. На промежуточной высоте наблюдается эффект спекания заполнителей, в результате чего по мере увеличения мощности лазера образуются более мелкие сферические частицы. Более высокая скорость потока газа-носителя может даже привести к переходу от несферических наночастиц к более мелким сферическим наночастицам по мере увеличения мощности лазера. Регулирование характерного времени спекания с использованием излучения CO-лазера в пламени представляется многообещающим способом получения более мелких, наноразмерных и сферических наночастиц даже при высокой скорости потока газа-носителя (Lee and Choi, 2000). Радиальные распределения интенсивности рассеяния и морфологические изменения также были изучены Ли и Чхве (2000).

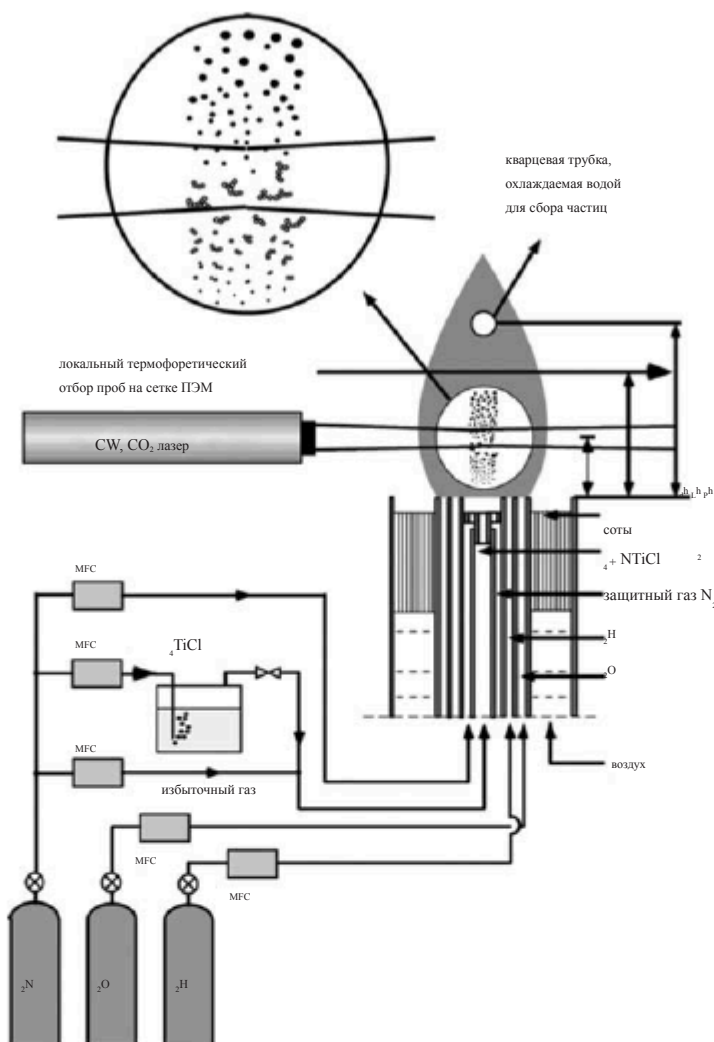


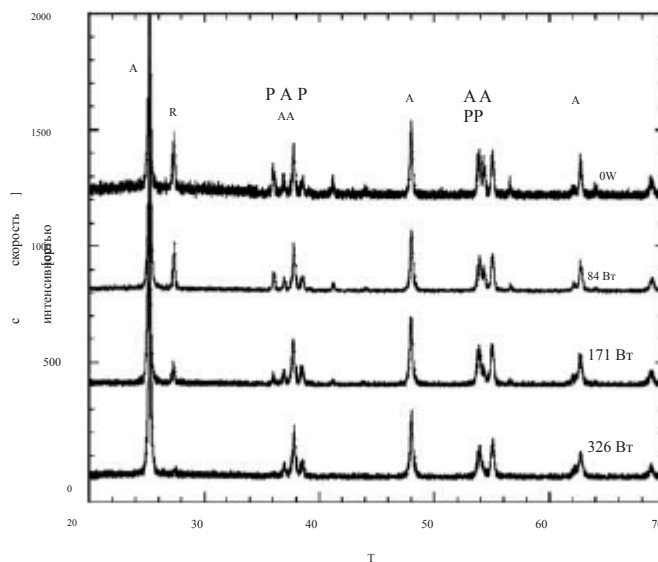
Схема синтеза с усилением коалесценции для получения более мелких и неагломерированных продуктов **Рисунок 12.7** наночастиц с контролируемой степенью кристалличности при высоких концентрациях: ОД (наружный диаметр Анну-Лар места, мм); ID (внутренний диаметр, мм). Перепечатано из книги "Ли и Чхве" (2000). Авторское право © 2000, с разрешения Elsevier.

Размер, морфология и кристаллическая фаза наночастицы определяют свойства наноструктурированного материала. Следовательно, овладение контролем свойств, в конечном счете, требует контроля размера, морфологии и фазы наночастиц. Нанодисперсные частицы высокой чистоты могут быть получены различными аэрозольными методами; однако агломерация считается почти неизбежной, когда наночастицы образуются в высоких концентрациях, необходимых для практического применения. Попытки контролировать агломерацию имели лишь ограниченный успех. Ли и Чой (2002) и Ли, Янг и Чой (2001) сообщили, что усиление коалесценции наночастиц с использованием облучения лазерным лучом агрегатов, образующихся в пламени, может быть решением этой проблемы и успешно контролирует размер, морфологию и кристаллическую фазу высококонцентрированных наночастиц диоксида кремния и титана. Этот принцип был продемонстрирован не только синтезом более мелких и неагломерированных наночастиц, но и

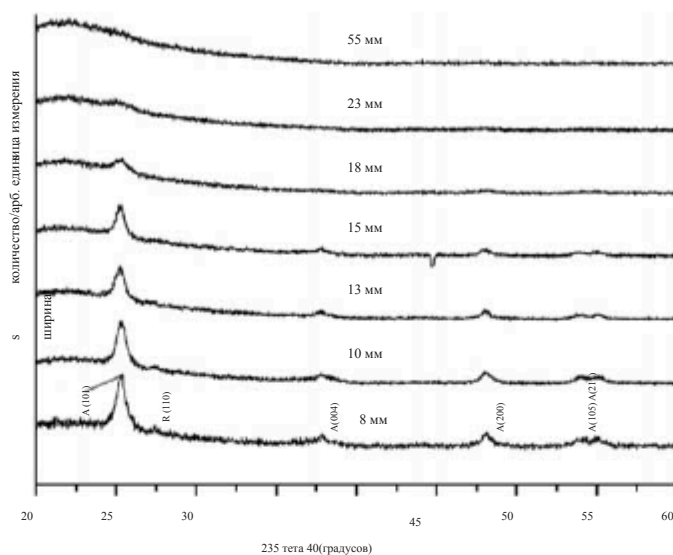
также вырабатывает их в высоких концентрациях. Кроме того, было показано, что метод был способен контролировать даже кристаллическую фазу наночастиц титана. Удивительно, ста-
Бле рутил диоксид титана частицы были преобразованы в метастабильном анатаза, а вес процентов
каждого этапа можно поставить под контроль. Исследования (Ли и Чой, 2002; Ли, Янг и Чой, 2001) с
использованием СО-лазерного облучения показали, что лазерное облучение может изменять фазу с рутила
на анатаз. Например, 16,6% рутила по массе в частицах, собранных на расстоянии 65 мм без
облучения СО лазером, становится почти 0% при облучении СО лазерным лучом на расстоянии 2

25 мм при мощности лазера $P=326$ Вт (см. рис. 12.8). Следует подчеркнуть, что исходное
окончательное содержание рутила при 25 мм без лазерного облучения составило 10,3%. Это
указывает на то, что частицы рутила размером 25 мм могут быть преобразованы в анатаз под
воздействием лазерного излучения. Этот результат можно объяснить возможным возникновением
плавления из-за облучения и последующей перекристаллизацией после прохождения зоны облучения
(диаметр луча: 3 мм). Необходимо обеспечить достаточно длительное время для перегруппировки
атомов, приводящей к более компактной и стабильной фазе рутила, но время охлаждения в системе очень
короткое: порядка 1 мс. Следовательно, исходная твердая фаза, которая может быть перекристаллизована
из расплавленного титана, может предпочесть метастабильную фазу анатаза. Кроме
того, процесс плавления должен уменьшить площадь горловины заполнителей, соответственно уменьшая
свободную энергию поверхности, которая считается движущей силой при преобразовании анатаза в
рутил. Следовательно, может быть получена более стабилизированная фаза анатаза, и это может быть
одной из причин, по которой частицы анатаза, перекристаллизованные в положении низкого облучения
 $h=11$ мм, сохраняют свою фазу даже после достижения положения сбора $h_p=65$ мм.

Еще более сложным примером являются композитные наночастицы, которые были широко
изучены как способ улучшения характеристик однокомпонентных наноматериалов
или получения различных свойств из их собственных составляющих (Vollath and Szabo, 2004).
В частности, композитные наночастицы SiO / TiO привлекли большое внимание благодаря своим 2



Изменения в профилях рентгеновской дифракции TiO_2 частицы для различных CO_2 лазер Рисунок
12.8 мощности; $h=25$ мм, $h_p=65$ мм. Перепечатано из Lee and Choi (2002). Авторское право © 2002,
с разрешения Elsevier.



Рентгенограммы собранного композитного порошка с увеличением высоты **Рисунок**

12.9 с поверхности горелки, без лазерного облучения. Перепечатано с сайта Sheen. et al. (2012).

Копия-справа © 2012, с разрешения Elsevier.

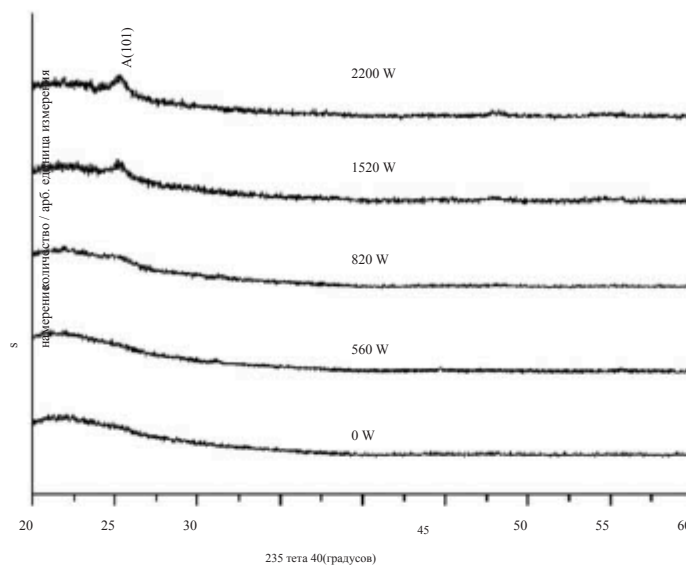
новые каталитические, механические и оптические характеристики (Старк и Працинис, 2002). Было изучено несколько процедур получения, включая пламенный гидролиз, пропитку, осаждение и золь-гель методы (Дютуа, Шнайдер и Байкер, 1995). Опять же, среди этих методов получения пламенный аэрозольный синтез имеет то преимущество, что он позволяет получать материалы высокой чистоты в одностадийном непрерывном процессе. Непрерывный СО-лазер облучается на $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ композитные наночастицы, генерируемые в пламени с целью контроля *in situ* кристаллическая фаза. Когда наночастицы созданы и растут вдоль пламени, тогда, в зависимости от состава, фаза анатаза может раствориться в аморфной смешанной фазе с диоксидом кремния. Однако при лазерном облучении фаза анатаза сохраняется гораздо лучше. Наиболее интересным и загадочным результатом является то, что лазерное облучение способно не только защитить уже существующую фазу анатаза от растворения, но и может *восстанавливать* кристалличность аморфной фазы даже после того, как фаза анатаза полностью растворилась на некоторой высоте над головкой горелки (см. Рисунки 12.9 и 12.10).

Показано, что лазерное излучение, применяемое выше этой высоты, не только преобразует первоначально аморфные композитные наночастицы в кристаллические, но также контролирует размер кристаллитов TiO_2 , встроенного в наночастицы SiO_2 , изменяя мощность облучающего лазера (Рисунок 12.10).

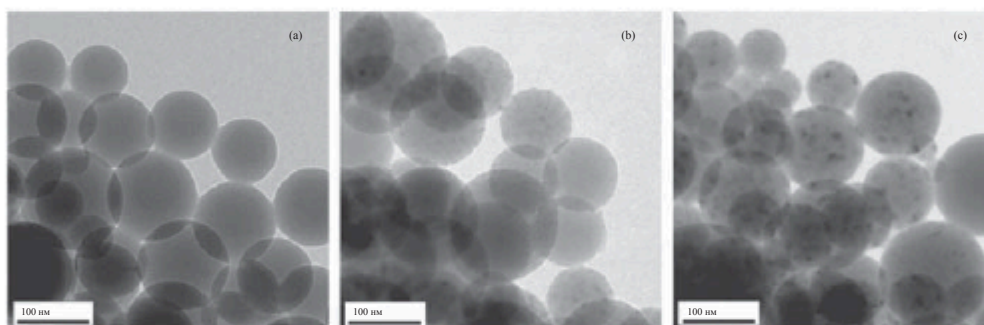
Рентгеноструктурный анализ и ПЭМ-анализ подтвердили, что размер TiO_2 количество кристаллитов анатаза в наночастицах кремнезема увеличивается с увеличением мощности лазера при облучении (рисунок 12.11). Было показано, что соответствующая граница поглощения $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ составляет наночастицами *ite* можно управлять, изменяя размер кристаллитов TiO_2 внутри SiO_2 наночастицы.

12.5 Лазерно-индуцированный синтез

Обычно лазерно-индуцированный синтез наночастиц связан с лазерной абляцией или испарением твердой мишени. Однако могут быть инициированы некоторые химические реакции в газовой фазе

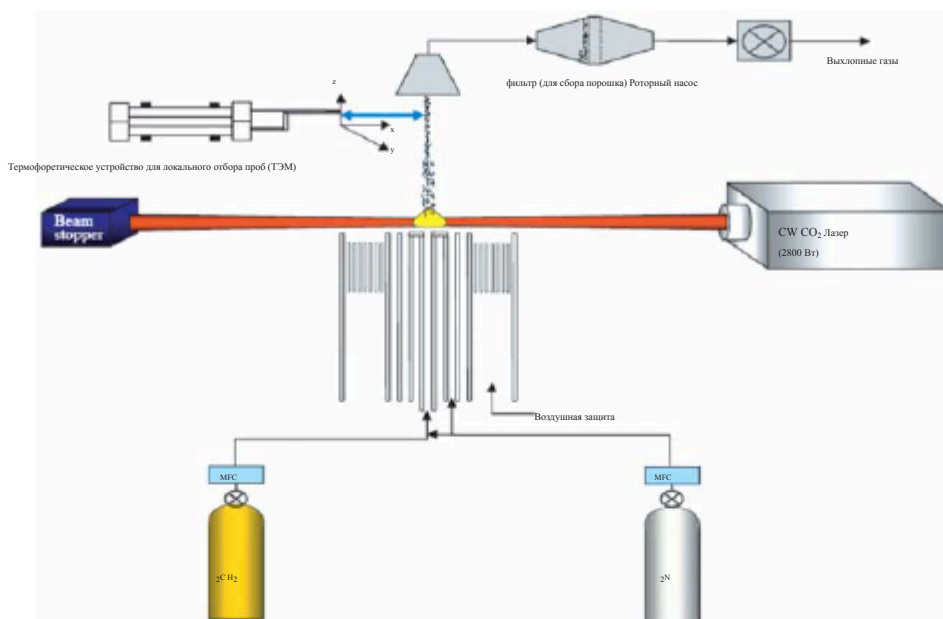


Эволюция картины дифракции рентгеновских лучей для частиц, полученных в пламени с помощью лазера **Рисунок 12.10** облучение при различных мощностях лазера; $r_h = 55$ мм, $z_h = 28$ мм. Перепечатано с сайта Sheen et al. (2012). Авторское право © 2012, с разрешения Elsevier.



Изображения SiO_2 с высоким разрешением, TiO_2 получены композитные наночастицы **Рисунок 12.11** с увеличением мощности облучающего CO_2 лазер; $r_h = 55$ мм, $z_h = 28$ мм: (a) 0 Вт, (b) 820 Вт, (c) 2200 Вт. Отчетливо видно выделение анатазной фазы из аморфной. Перепечатано с сайта Sheen et al. (2012). Авторское право © 2012, с разрешения Elsevier.

и поддерживается исключительно лазерным облучением (также называемым "лазерным фотолизом" или "лазерным пиролизом"; Шмидт-Отт, 2011) без какой-либо помощи кислорода или любых других окислителей, подобно хорошо известной диссоциации молекул этилена C_2H_4 при облучении CW CO_2 инфракрасный лазерный луч с длиной волны 10,56 мкм, который эффективно поглощается молекулами, резонансными с частотой колебательного режима CH_2 группа на высоте 949 см^{-1} . Многофотонное поглощение приводит к молекулярной диссоциации, так что углерод и водород высвобождаются при достаточно высокой плотности мощности лазера. Углеродные и углеводородные кластеры, образующиеся в результате диссоциации, могут в дальнейшем конденсироваться в углеродные наночастицы, в основном в углеродную сажу, когда мощность лазера не очень высока. Кроме того, образуются полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Более того, некоторые типы углеродных наночастиц вообще не могут быть получены без помощи лазера. Действительно, эксперименты по облучению ацетилена



Экспериментальная установка. Поток ацетилена взаимодействует с лазерным лучом. На Рисунке

12.12 поток ацетилена защищен от кислорода в воздухе газообразным экраном из азота. Перепечатано с разрешения Пихицы *et al.* (2005). Авторское право 2005 года предоставлено Американским физическим обществом.

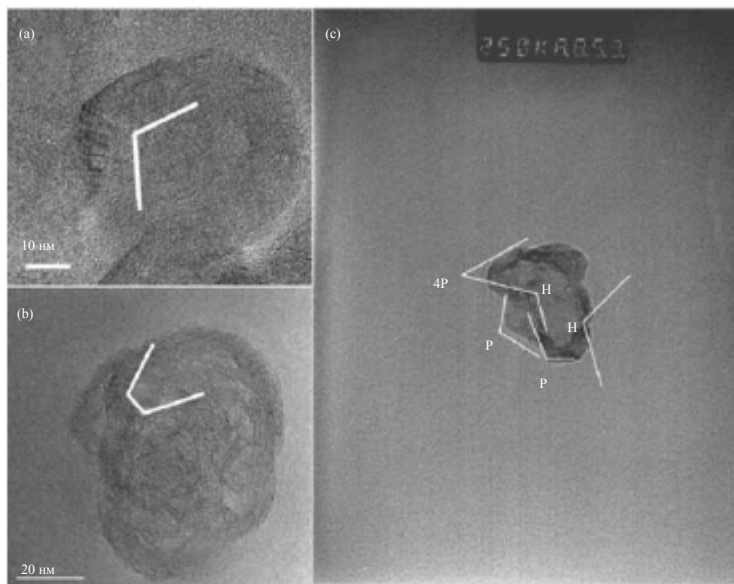
впрыскивается внутрь конуса кислородно-водородного пламени и облучается постоянным выбросом CO_2 лазер привел к получению многогранных наночастиц с углеродной оболочкой вместо обычной ацетиленовой сажи, которую можно было бы ожидать от окисления ацетилена в пламени (Choi *et al.*, 2004).

Создание углеродных оболочек с развитой слоистой структурой графена само по себе было загадкой в Choi *et al.* (2004), потому что роль кислородно-водородного пламени не была понята.

Фактически, слоистая структура графена sp^2 помогла наночастицам пережить высокую температуру, проходя через перо кислородно-водородного пламени, в отличие от частиц ПАУ или сажи, которые могли образовываться даже без воздействия лазера. Практически никаких частиц не образовывалось без лазерного облучения при включенном кислородно-водородном пламени.

Позже это было установлено (Пихица *et al.*, 2005), что реакции, приводящие к образованию углеродных оболочек, могли происходить без какого-либо пламени, поддерживающего кислород-водород, и даже когда ацетилен был защищен от кислорода, несмотря на то, что ацетилен не поглощает лазерное излучение толщиной 10,56 мкм (рисунок 12.12).

Температура газообразного ацетилена в потоке этой реакционной зоны была очень низкой: ниже 500 °C. Это указывает на то, что атермические процессы были ответственны за образование углеродных оболочек на рисунке 12.13. Но реакция диссоциации ацетилена все еще может самоподдерживаться с помощью промежуточных продуктов реакции в стационарном состоянии, которые поглощают лазерное излучение. Спектроскопия сильно разбавленного (так называемого "синего") пламени ацетилена или этилена, облученного CO лазерный луч доказывает, что существует существенное взаимодействие между лазерным лучом и промежуточными соединениями, и что это взаимодействие особенно выражено для ацетилена, который содержит меньше водорода и, следовательно, образует больше С-димеров (которые являются предшественниками углерода оболочки), которые будут генерироваться без пассивации водородом (рис. 12.14).



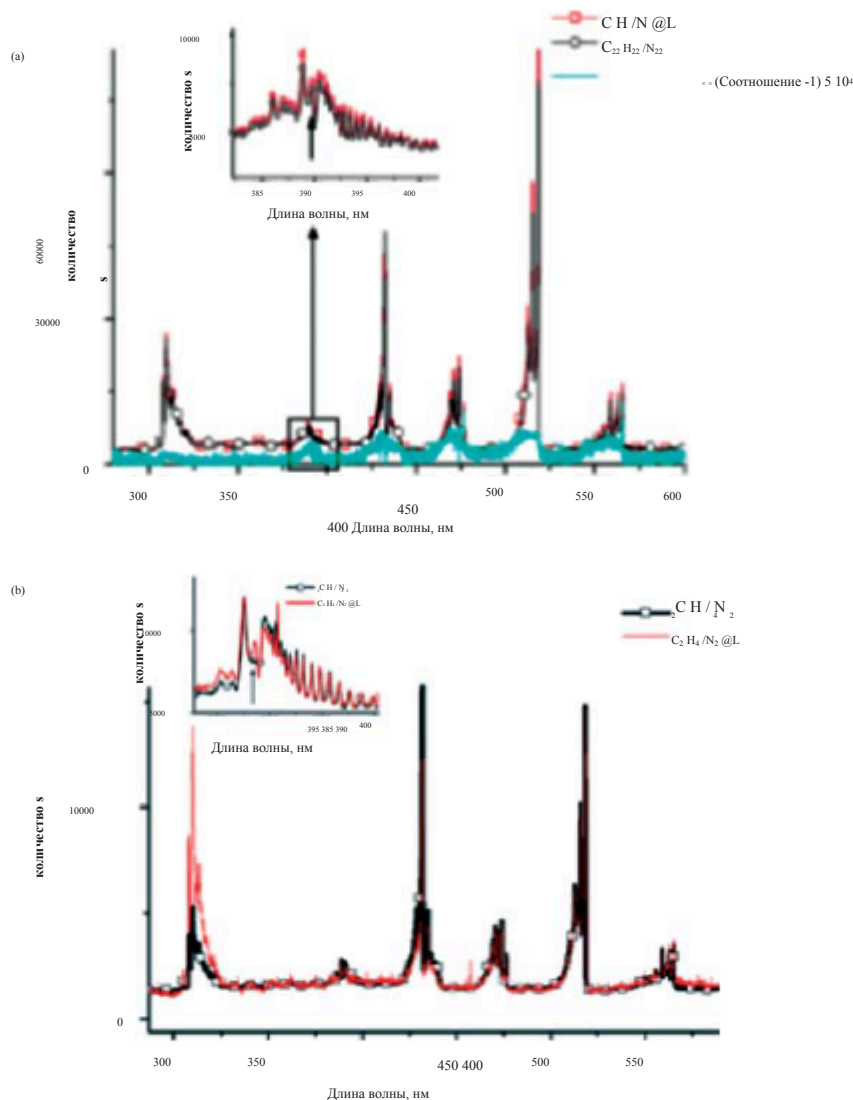
Геометрия углеродных наночастиц в форме оболочек различного типа, видимая в ПЭМ **Рисунок 12.13** Изображения. (a,b) Угол при вершине, $112,88^\circ$ ДЛЯ кольца из пяти элементов угол обозначен белыми линиями. (c) Углы пятиугольника и семиугольника, вызванные дефектами, обозначены буквами P и H соответственно. Перепечатано с разрешения Pikhitsa et al. (2005). Авторское право © 2005, Американское физическое общество.

Чтобы запустить реакцию с помощью лазера, промежуточные соединения следует поджигать только с использованием другого источника. Это первоначальное воспламенение может начаться с обычного диффузионного пламени ацетилена под воздействием лазерного луча, а затем, после того, как пламя будет погашено защитным экраном из инертного газа (азот или аргон), который блокирует атмосферный кислород, реакция может продолжаться без какого-либо кислорода или пламени, и только непрерывный СО-лазер поддерживает самоподдерживающуюся реакцию диссоциации ацетилена с образованием углеродных наночастиц, с некоторыми интересными результатами. Опять же, чистый ацетилен, который не поглощает частоту лазерного луча, очень эффективен в Ch / лазерном синтезе углеродных многогранных наночастиц в форме оболочек с помощью лазера.-

поглощающие промежуточные продукты. Особая электронная структура этих наночастиц, а именно их многогранные угловые дефектные состояния (рис. 12.13), обеспечивает специфические оптические свойства. Для например, они показывают знаменитый выпуклый изгиб на кривой поглощения длиной волны 220 нм (Пихица *et al.*, 2005) найден в межзвездной пыли. Важно, что лазерно-индуцированный синтез непосредственно из ацетилена марки N5 не приводит к образованию примесей в углеродных наночастицах, что делает их интересными для использования в качестве шаблонов и в качестве хорошо организованного материала при сборке наночастиц. В следующих параграфах приведены два примера возможностей наноструктурированных материалов, изготовленных из полиэдральных углеродных оболочек: эмиссия холодным электронным полем и зондирование газов H и CO при комнатной температуре.

2

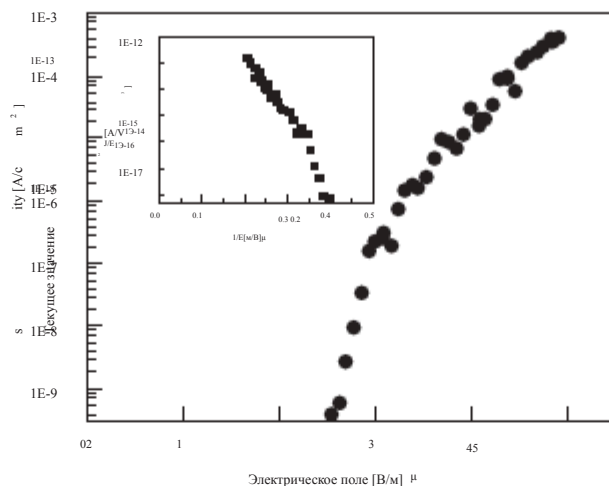
Электронные дефекты в этих наночастицах объясняют высокий коэффициент усиления их полевой эмиссии холодных электронов. Действительно, холодная электронная полевая эмиссия углеродных частиц была протестирована на углеродных нанотрубках (Choi). *et al.*, 2004; Альтман, Пихица и Чой (2004a, b) и было обнаружено, что первые показали себя даже лучше, чем вторые, которые



Спектры разбавленного азотом ацетиленового синего пламени, пламя под лазером **Рисунок**

12.14 облучение и соотношение (лазер включен/лазер выключен) спектров. (а) Профиль линии демонстрирует увеличение количества C_2 -димеров в пламени из-за лазерного облучения. (б) Напротив, пламя этилена, разбавленного азотом, демонстрирует усиление только ОН-полосы при 310 нм из-за большего количества водорода в молекулах. На вставках показаны фиолетовая система CN/CH и (0-0) головка диапазона фиолетовой системы CN(B-X) (стрелка). Адаптировано с разрешения Пихицы, Ким и Чхве (2011).

предполагалось, что они обладают огромным коэффициентом усиления электрического поля из-за их высокого соотношения сторон. Загадка о том, почему наночастицы с углеродной оболочкой показали почти одинаковые характеристики, несмотря на отсутствие такого соотношения сторон, была решена Альтманом, Пихицей и Чой (2004а, б). Оказалось, что структура углеродных наночастиц диктует существование электронных состояний, которые допускают двухэлектронные процессы при полевой эмиссии. Проявлением этого своеобразного механизма является характерное "колени" на графике Фаулера-Нордхейма (рис. 12.15). Захват одного электрона вблизи поверхности углеродной наночастицы приводит к появлению другого



Типичная полевая эмиссия холодных электронов от углеродных наночастиц в форме оболочки. Рисунок 12.15

Напряжения включения составляет 2,5 В/μм. На вставке показан участок Фаулера-Нордхайма с характерным "коленом". Адаптировано с разрешения Чоя. et al. (2004).

электрон покидает материал в вакууме (Альтман, Пихица и Чой, 2004а, b). Электрическое поле первого электрона значительно усиливает локальное электрическое поле и, следовательно, создает огромный коэффициент усиления, который ранее приписывали огромному соотношению сторон нанотрубок. Затем стало ясно, что колпачки на круглых кончиках нанотрубок на самом деле действуют так же, как наночастицы. Этот пример демонстрирует полезность правильно наноструктурированного материала.

Другим примером отличных характеристик углеродного наноструктурированного материала является комнатная температура H_2 зондирование газов CO с помощью цепочек углеродных наночастиц (Kim et al., 2011).

Дефекты в сочетании с высокой проводимостью отдельных наночастиц могут приводить к высокой чувствительности к окружающей среде, которая может быть использована в датчиках. Перенос электронов по цепочке ограничен переносом заряда между наночастицами, и эта особенность может быть использована вместе с химической чувствительностью сопротивления молекулам водорода даже при комнатной температуре. Вполне понятно, что для газообразного водорода любое повышение температуры нежелательно из-за опасности воспламенения при наличии кислорода. Тем не менее, не было достигнуто успеха в определении CO и H_2 при комнатной температуре без использования каких-либо катализаторов или гибридов. Однако было обнаружено (Kim

et al., 2011), что возможно

использовать газовый датчик на основе кристаллических оболочечных углеродных наночастиц (SCNP) для обнаружения CO и H_2 при комнатной температуре. Газовый датчик

2

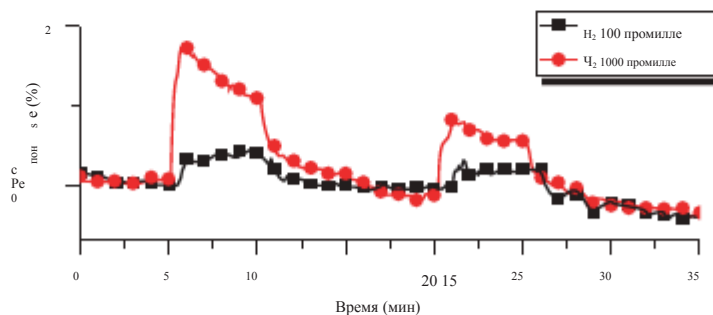
молекулы, такие как CO и H_2 при комнатной температуре, как на воздухе, так и в инертной атмосфере.

Эти SCNP были функционализированы обработкой азотной кислотой, что имело решающее значение для проявления газочувствительных свойств, и были организованы в цепочки или пленки. Датчик SCNP может восстанавливать работу даже в инертной атмосфере, что предполагает, что за обнаружение молекул H_2 при комнатной температуре отвечает иной механизм, чем тот, который применяется в обычных газовых датчиках на основе катализатора. SCNP были синтезированы с помощью CW CO₂ лазерное облучение чистого потока ацетилена (Пихица et al., 2005). В горелку подавался чистый ацетилен, и при зажигании образовывалось ацетиленовое пламя. Инфракрасный CO-лазер (Bystronic, BTL2800) облучали пламенем ацетилена, а газообразный азот использовали в качестве защитного газа для блокирования реакции с

окружающий воздух. После лазерного облучения кристаллические углеродные наночастицы могли быть получены без каких-либо катализаторов. Также были получены частицы сажи из ацетиленового пламени. Образующиеся частицы углерода собирались системой фильтрации, подключенной к вакуумному насосу. Фильтр был установлен над горелкой для сбора образующихся частиц непосредственно из потока частиц. SCNP были преобразованы в сенсорные устройства методом ионно-индуцированной фокусировки (Kim *et al.*, 2006). Метод ионно-индуцированной фокусировки (Kim *et al.*, 2006) требует хорошо диспергированная заряженная аэрозольная форма SCNPs. Для получения хорошо диспергированного раствора гидрофобных SCNPs проводили химическую обработку азотной и серной кислотой при 110°C. Обработка кислотой может сделать поверхности SCNPs гидрофильными за счет присоединения функциональных групп, таких как карбоксильные и гидроксильные группы; она может разделять SCNPs и, таким образом, поддерживать их хорошую диспергированность в растворителе. Au (электрод, 50 нм)/Ti (адгезионный слой, 10 нм) формировали на SiO (термическое окисление). Химически функциональный газовый датчик на основе SCNP работает при низких концентрациях CO и H₂ при комнатной температуре, даже без катализаторов Pd или Pt, обычно используемых для расщепления H₂ молекулы превращаются в реакционноспособные атомы H, в то время как газовые сенсоры на основе оксида металла и газовые сенсоры на основе простых углеродных нанотрубок, используемые для определения молекул CO и H₂, могут работать только при повышенных температурах. Расщепление H₂ молекулы могут располагаться на многочисленных краях графеновых пластинок, как предположил Браунинг *et al.* (2002). Дополнительная диссоциативная адсорбция может происходить на чрезвычайно изогнутых участках внешних оболочек обработанных кислотой SCNP, подобно предсказанной диссоциации H на ОУНТ малого диаметра (Тада, Фуруя и Ватанабе, 2001). Это было предложено Кимом *et al.* (2006), что механизм наиболее эффективной диссоциации может быть тот, который использует как графеновые ребра, так и их функционализацию кислородными группами. Действительно, молекула водорода может диссоциировать на краях окисленных/функционализированных графеновых листов (могут иметь значение краевые группы OH и C=O) по следующей обратимой схеме.

Во-первых, $\text{OH} + \text{H}_2 + \text{M} \rightarrow \text{H} + \text{H}_2\text{O} + \text{M}$ производит атомы H (M обозначает тромбоциты). После диссоциации миграция атомов H может напоминать побочный процесс, когда атомы H мигрируют по CO, только вместо Pd или Pt обработанные кислотой края углеродных пластинок теперь играют свою каталитическую роль в диссоциации (Псофоганнакис и Фрудакис, 2009). Во-вторых,

обратный процесс "ассоциации" происходит, когда $\text{H}_2\text{O} + \text{M} \rightarrow \text{O} + \text{H}_2 + \text{M}$ (см. Рисунок 4 в Чжу *et al.*, 2002). Здесь связанная молекула воды играет роль простого промежуточного продукта, и поэтому процесс восстановления не требует окружающего кислорода и может происходить в инертной атмосфере азота, как было замечено (см. Рис. 12.16).



Характеристики датчика частиц сажи, обработанного кислотой, при комнатной температуре- Рисунок

12.16 рисунок. Реакция на водород была получена в атмосфере азота, чтобы проверить механизм восстановления. От Kim *et al.* (2011). © Издательство IOP Publishing. Воспроизведено с разрешения издательства IOP Publishing. Все права защищены. Цветное исполнение смотрите в разделе "Пластины".

В Kim также был исследован первозданный газовый датчик на основе SCNP *et al.* (2011), чтобы прояснить роль функциональных групп, образующихся на поверхностях функционализованного SCNP. Закрытый газовый датчик SCNP не реагировал на восстановительные газы при комнатной температуре, но значительно реагировал при повышенных температурах, что указывает на другой механизм измерения, отличный от химически функционального датчика SCNP.

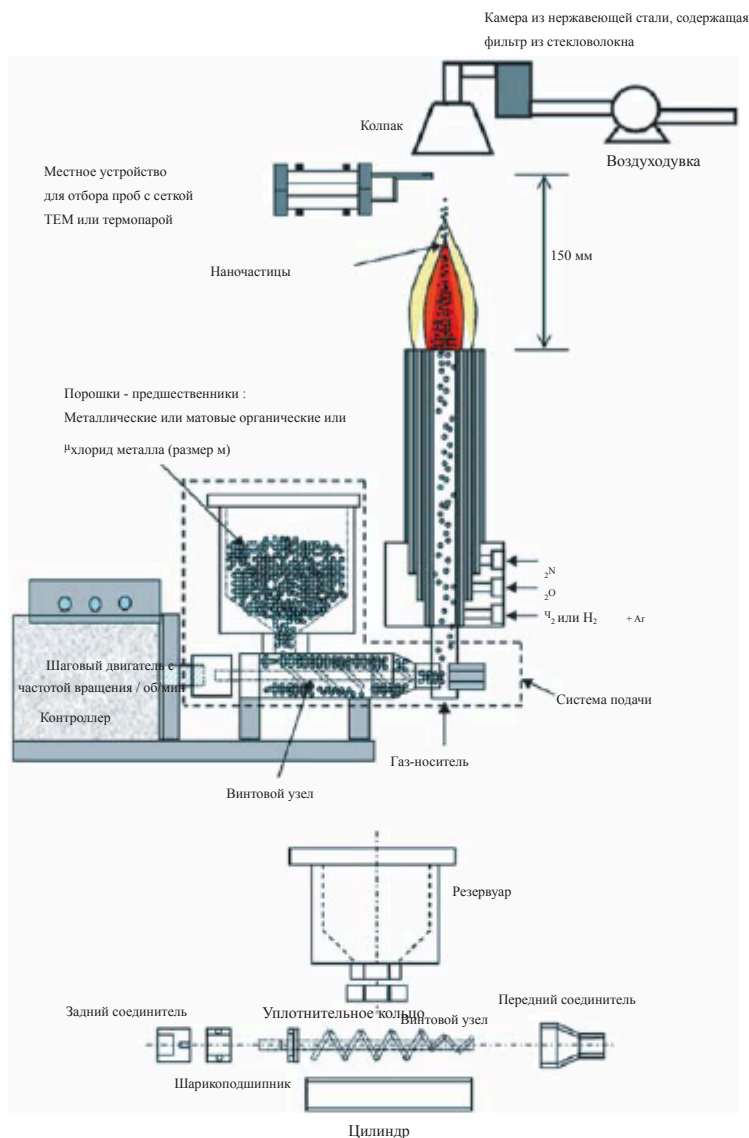
12.6 Сжигание металлического порошка

Метод сжигания металла - это один из способов получения наночастиц, в основном металлических наноксидов. В нескольких исследованиях сообщалось об оптимизации процессов горения металла для использования в качестве твердого топлива для ракет, огнеупорного материала, катализатора и так далее.

Сжигание твердых прекурсоров может происходить по типу самораспространяющегося горения, хорошо известному для Mg metal. Традиционный метод сжигания металла требует, чтобы реагент был введен в цилиндрическую таблетку и произошел процесс воспламенения. В этом процессе реагент в таблетке, воспламеняемый внешним источником, таким как вольфрамовая катушка, лазер и микроволновая печь, либо локально, либо равномерно инициирует экзотермическую реакцию и поддерживает самосожжение, образуя частицы оксида. Тем не менее, было бы желательно получение наночастиц в стационарном режиме. Такой метод сжигания металла в пламени для непрерывного синтеза наночастиц оксида металла был реализован Янгом. *et al.* (2010). Предшественники металлического порошка микроразмерного размера вводили в водородно-кислородное пламя через недавно разработанную систему подачи (рис. 12.17), чтобы они были полностью преобразованы в наночастицы оксида металла с хорошей кристалличностью. Нет ограничений на выбор прекурсоров, включая металл, хлорид металла и металл органические порошки, для синтеза наночастиц. Было продемонстрировано, что с помощью этого метода успешно получают различные оксиды, такие как магнезия (рис. 12.18), оксиды железа и оксид цинка. Размеры оксидных наночастиц регулируются путем изменения температуры пламени и времени выдержки.

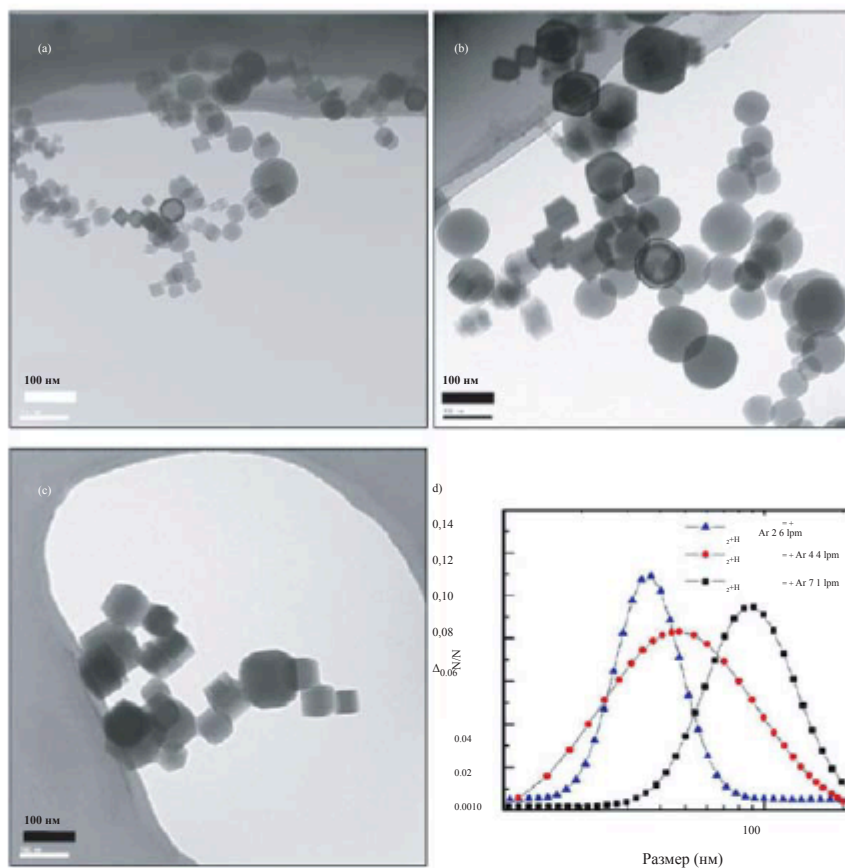
Одним из наиболее впечатляющих аспектов горения металла является возможность контроля легирования, по крайней мере, при низких уровнях легирования; это позволяет обнаружить и назначить интересующую пару линий нулевого фона (ZPLs) в Mn^{2+} -легированные наночастицы MgO (Altman *et al.*, 2003). Излучение наноразмерного MgO представляет особый интерес, связанный с недавним обнаружением роста углеродных нанотрубок на нанокубах MgO и предсказанием нового типа наноразмерных оптоэлектронных схем на основе нанокристаллов MgO (Vajtai *et al.*, 2002). Четкие линии нулевого фона были обнаружены в макроскопических фотонах из нанокристаллов MgO и пленках MgO, полученных при выгорании частиц Mg на воздухе (Altman *et al.*, 2003). Эти линии связаны с испусканием различных ионов (Mn^{2+} и Cr^{3+}) в матрице MgO. Mn^{2+} ZPLs никогда не встречались в такой системе, как bulk MgO: Mn^{2+} , несмотря на интенсивное исследование, которое делает Альтман *et al.* (2003) находит фундаментальный ответ. Четкость наблюдаемых линий по сравнению с линиями матрицы квантовых точек представляет интерес для оптической нанoeлектроники.

Нанокристаллический MgO может быть легко синтезирован путем выжигания частиц Mg на воздухе. Частицы, собранные из дыма MgO, представляют собой идеальные кубики со средним размером около 40 нм. При нанесении продукта сгорания Mg на подложку также образуются пленки MgO. На рисунке 12.19 показаны ПЭМ-изображения нанокристаллов и пленки MgO. Рентгеноструктурный анализ демонстрирует высокую кристалличность синтезированного MgO. По порядку

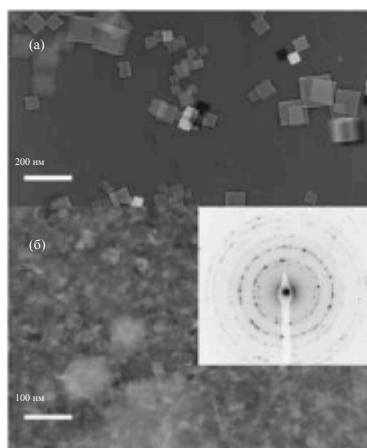


Экспериментальная установка метода сжигания металла в пламени и детали Рисунок 12.17

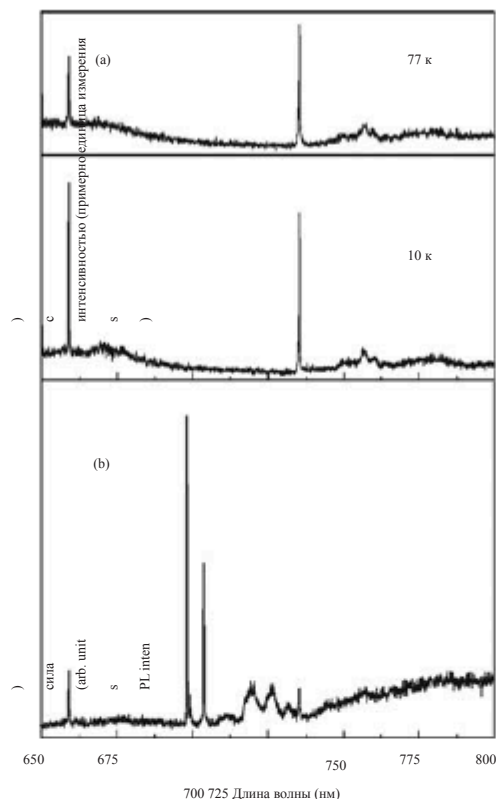
недавно разработанная система подачи. Металлы микроразмерности, такие как Mg (диаметр: 50-100 μm , овальная форма, чистота 98%), Zn (диаметр: 10-40 μm , сфера, чистота 90%), Fe (диаметр: 3-13 μm , овальная форма, чистота 90%), порошки-предшественники металлических органических соединений ($\text{Fe}(\text{CHO})$) и хлорида металла (PtCl) в диапазоне от 50 до 100 μm подаются через центральное сопло коаксиальной горелки с помощью системы непрерывной подачи и газа-носителя. Твердые прекурсоры, хранящиеся в резервуаре-накопителе, подаются с помощью винтового стержня внутри цилиндра. Скорость подачи прекурсоров регулируется контроллером RPM (количество оборотов в минуту), подключенным к шаговому двигателю, который вращается на 0,08° за каждый шаг. Эти порошки-предшественники переносятся газообразным азотом и впрыскиваются в водородно-кислородное пламя. Водород и кислород впрыскиваются через два концентрических кольца рядом с центральным соплом для создания водородно - кислородного диффузионного пламени. Сжатый сухой воздух подается через внешнюю трубку, снабженную ячеистой структурой для стабилизации пламени. Температура пламени контролируется соотношением $[\text{H}]/[\text{O}]$ и измеряется с помощью термопары типа В. Измеренное значение пламени : температуры корректируются с учетом потерь тепла при излучении. Наночастицы оксида металла собираются с помощью устройства для локального термофоретического отбора проб. Морфология наночастиц оксида металла наблюдается с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ, модель JEM-2000, JEOL). Перепечатано от Yang et al. (2010). Copyright © 2010, Эльзевир.



ПЭМ-изображения наночастиц оксида магния, полученных при различных концентрациях водорода. **Рисунок 12.18** скорости потока. (а) 2 л/мин газообразного водорода. (б) 4 л/мин газообразного водорода. (в) 7 л/мин газообразного водорода. (д) Распределение частиц по размерам для всех трех случаев. Перепечатано с Yang et al. (2010). Авторское право © 2010, Elsevier. Цветное исполнение смотрите в разделе "Пластины".



ПЭМ-изображения нанокристаллического MgO. (а) нанокристаллы MgO. (б и вставка) MgO **Рисунок 12.19** пленка. Картина дифракции электронов на (б) подтверждает высокую кристалличность пленки. Перепечатано с разрешения Альтмана et al. (2003). Авторское право © 2003, Правами управляет AIP Publishing LLC.



Спектры непрерывной ФЛ из наноразмерного MgO. (a) Спектры ФЛ из пленки MgO

Рисунок 12.20 легированный Mn, возбуждаемый He-Cd лазером при различных температурах. (b) Спектр PL от нанокристаллического MgO, легированного Mn и Cr; возбуждаемого Ar-ионным лазером при 10 K. Перепечатано с разрешения Альтмана. et al. (2003). Авторское право © 2003, Права принадлежат AIP Publishing LLC.

для легирования MgO примесями переходных металлов Mn и Cr сжигают смеси чистых частиц Mg и Mn- или Cr-содержащих солей.

переходы могут быть назначены с помощью

ZPLs (рис. 12.20a), для системы Mn²⁺ низкоэнергетический ZPL длиной волны 735 нм, несомненно, возникает в результате самого низкого возможного перехода в системе, а именно перехода от самого низкого возбужденного $T_{14} (^4 G)$ к $A_{16} (^6 S)$ состоянию. Можно легко показать, что энергия следующего возбужденного состояния, $T_{24} (^4 G)$, не может соответствовать ZPL с длиной волны 659 нм, в то время как ZPL с длиной волны 735 нм уже присвоен $T_{14} (^4 G) - A_{16} (^6 S)$ переходный период. В то же время переход из состояния, возникающего в результате расщепления I^2 срок пребывания на земле $A_{16} (^6 S)$ государство может производить ZPL с длиной волны 659 нм. Поскольку состояния с разными электронными членами ответственны за два наблюдаемых ZPL, переходам могут соответствовать два существенно отличающихся параметра Хуанга- Риса. Отсутствие копий фононов для ZPL с длиной волны 659 нм (которые, вероятно, слабо связаны с фононами) и их существование для ZPL с длиной волны 735 нм (см. Рисунок 12.20a) подтверждают эту идею. Вышеупомянутая идея использования I^2 термин, соответствующий наблюдению, является единственным способом объяснить такой непредвиденный факт, как одновременное появление двух ZPL, происходящих из одного и того же переходного иона в матрице. Типичный непрерывный спектр PL, измеренный при 10 K для образца, легированного Cr (который, очевидно, содержит

некоторое количество примеси Mn) показано на рисунке 12.20b.

Обратите внимание, что ZPL, происходящие из Mn^{2+} переходы в кубическом кристаллическом поле ранее наблюдались только в спектрах ФЛ узкополосных материалов. Тепловое тушение и выход ФЛ, наблюдаемые в настоящей работе по ZPLs, аналогичны таковым для ФЛ, когда излучающие состояния возбуждаются близкими электронными состояниями. С таким широкозонным веществом, как MgO, эти состояния должны лежать глубоко внутри запрещенной зоны и, следовательно, не могут существовать в обычных кристаллах MgO. Передача энергии между окружающей средой и возбужденными состояниями Mn^{2+} ион, таким образом, не возникает, превращение Mn^{2+} возбуждение ионов невозможно. Это объясняет, почему в обычных кристаллах MgO Mn^{2+} -исходящие ZPL не наблюдаются. Обратите внимание, что если наночастицы образуются в результате конденсации пара во время горения, то будет наблюдаться высокая концентрация низкокоординированных дефектов (углов, террас и т.д.) На поверхности частиц и дефектов в веществе. Именно наличие этих дефектов, которые являются отличительной чертой частиц, синтезируемых горением, приводит к существованию состояний глубоко внутри запрещенной зоны и к возможности возбуждения Mn^{2+} ион в матрице MgO и, следовательно, к появлению ZPLs, происходящих из Mn, в PL. Таким образом, мы можем утверждать, что наноразмерные оксиды, образующиеся при горении металлов, образуют особый класс материалов и, что представляет особый интерес, позволяют создавать идеальные ZPL.

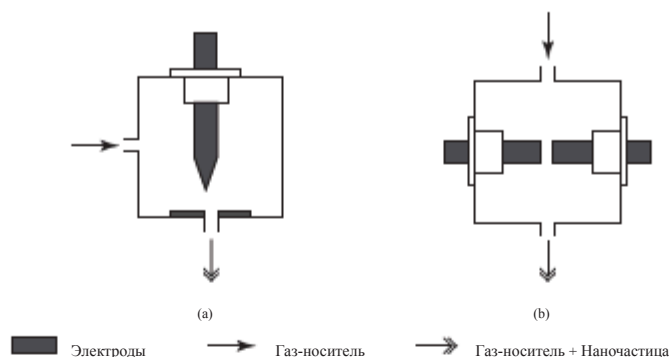
12.7 Искровой разряд

Искровой разряд в атмосфере - это простой и надежный способ получения частиц нанометрового размера в различных методах газовой фазы синтеза (Biskos *et al.*, 2008). Он может генерировать заряженные аэрозоли, используя простую установку, которую можно использовать для создания наноструктур с помощью контролируемого электрического поля (Krinke *et al.*, 2002). Генераторы искрового разряда типа "Стержень-к-стержню" (RR-SDG) были широко изучены, и влияние их параметров было четко определено (Табризи *et al.*, 2009). Точка-сетка конфигурация была изучена для того, чтобы продемонстрировать, что производство аэрозолей короны в чистоте газа при атмосферном давлении связано с развитием плазменных нитей, которые достигают минимум поля электрической сетки в Streamer и искры-режимы разряда с положительной точки сброса, в то время как образование аэрозолей происходит только в Искре режима с отрицательной точки выгрузки (Борра *et al.*, 1998). Хотя SDG известен производства наноразмерных частиц, заряженных аэрозолей менее чем 10 нм диаметр в высоких концентрациях, как правило, получают из агломерированной из-за пост-электростатическим агломерация биполярного наночастиц в результате после выгрузки диффузии заряда в биполярных ионов облака, в котором было изучено путем измерения пост-Искра ионной плотности для PP-ЦУР. Предотвращение агломерации и образования большего количества заряженных аэрозолей меньшего размера с помощью этого простого метода могло бы еще больше усилить его преимущества и расширить диапазон его применения. Агломерация частиц в SDG может быть уменьшена путем регулирования таких рабочих параметров, как частота искрообразования, энергия искры и расход газа-носителя в течение примерно 101 ч.л. (Табризи.,

et

al 2009). В таких системах, как печные реакторы и пламенные реакторы, ионы использовались для предотвращения агломерации частиц (Nakaso *et al.*, 2003).

SDG типа "штырь-пластина" (Han *et al.*, 2012) был изучен и сравнен с традиционным RR-SDG. Генератор типа "штырь-пластина" имеет асимметричные электроды, содержащие штырь с острым наконечником в качестве положительного электрода и заземленную пластину с узким выходным отверстием на конце.



Две различные конфигурации генератора искрового разряда. (а) Тип "Штырь-пластина" Рисунок 12.21 конфигурация электрода. (b) Конфигурация электрода типа "стержень к стержню". Перепечатано с разрешения компании Han et al. (2012). Авторское право © 2012, Elsevier.

в центре (рисунок 12.21а). По сравнению с обычным RR-SDG (рис. 12.21b), генератор типа "штырь-пластина" производит гораздо меньшие, неагломерированные заряженные наночастицы с более узким распределением по размерам и почти равным распределением заряда при более высоких концентрациях (рис. 12.22). Наночастицы сплава In-Sn, серебра и меди были протестированы с использованием этих двух различных конфигураций, и их размер, морфология и состояние заряда были проанализированы с учетом параметров искрообразования и характера течения в каждой конфигурации. Генерация гораздо меньших, неагломерированных наночастиц с узким распределением по размерам с помощью генератора типа "штырь- пластина" может быть в основном объяснена гораздо более быстрым переносом полученных частиц, чем достигается при использовании генератора типа "стержень-пластина".

12.8 Сборка полезных Наноструктур

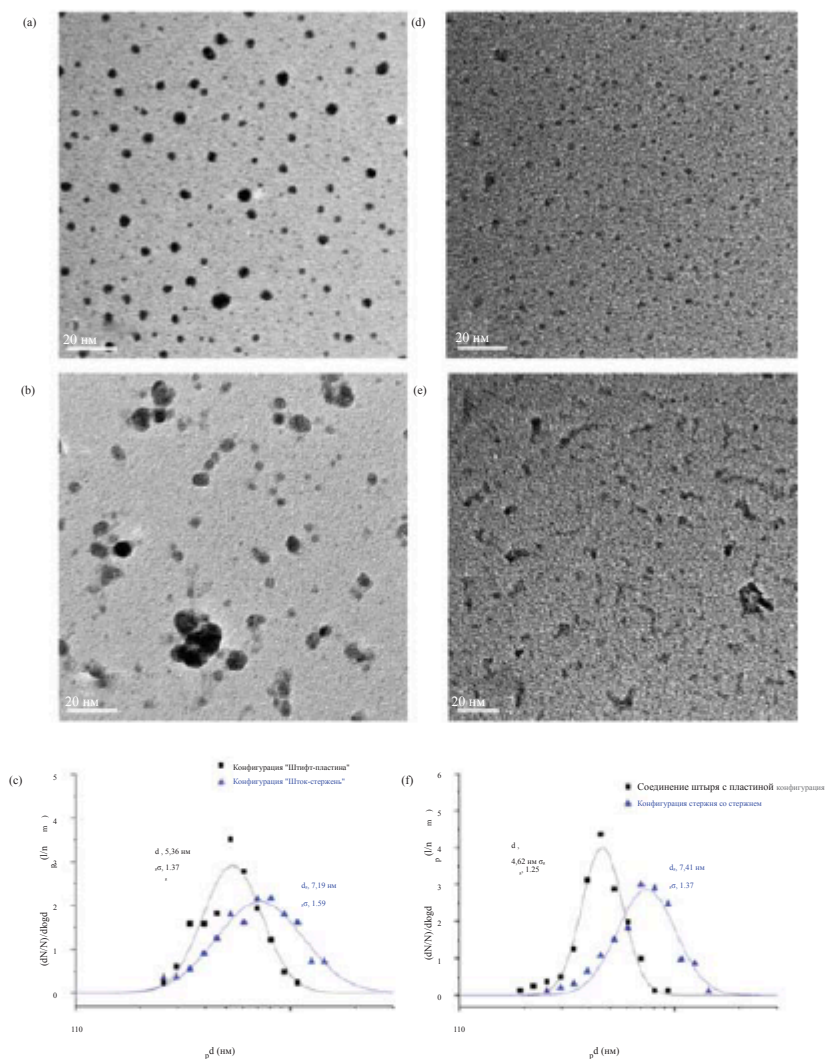
После создания наночастиц возникает вопрос, как их собрать, чтобы использовать их взаимодействие и в конечном итоге получить хорошо контролируемые наноструктурированные материалы. Использование таких наночастиц в качестве строительных блоков при изготовлении квантовых, фотонных или биологических наноструктур требует надежной структуры частиц.

Сообщалось о различных подходах, использующих различные физические силы, такие как поле микрожидкостного потока, магнитное поле, аэродинамическая сила инерции, каркас ДНК, узел направленной печати и наноксерография.

Недавно было описано несколько методов

повышения разрешения структуры частиц, включая параллельную фокусировку заряженных аэрозолей, вызванную ионами, электростатический метод на основе р-п-перехода и электростатическую воронку с использованием химической обработки поверхности в жидкой фазе, что позволяет создавать структуры частиц меньшего размера, чем исходные, из-за их способности фокусировать.

Существует наиболее точный способ фокусировки генерируемых наночастиц с помощью искрового разряда в заданные места на подложке. Этот метод использует наноскопические линзы электрического поля, которые естественным образом проявляются в любой структуре с рисунком, если она должным образом заряжена (Kim et al., 2006). Разработка наноструктур, использующих уникальные свойства наночастиц, потребует высокоскоростных методов нанесения рисунка из наночастиц на поверхности больших площадей и с высоким разрешением. Более того, метод должен работать как с проводящими, так и с непроводящими поверхностями. Подход с ионно-индуцированной параллельной фокусировкой (Kim et al., 2006)



Наночастицы серебра и меди, генерируемые искровым разрядом с зазором dis - Рисунок 12.22

диаметр 2,5 мм, расход газа аргона 3,5 л / мин и приложенный положительный потенциал 5 кВ. (а)

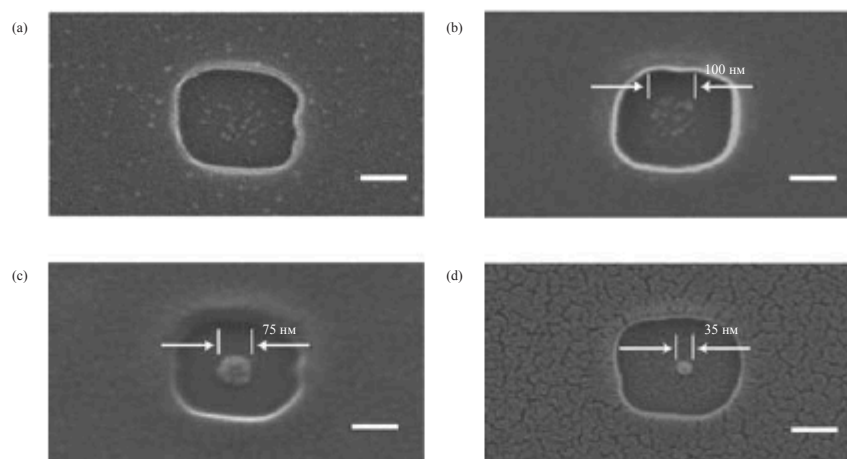
ТЕМ-изображение частиц серебра для SDG типа "штырь-пластина". (b) ТЕМ-изображение частиц серебра для RR-SDG.

(с) Распределение частиц серебра по размерам. (d) ТЕМ-изображение частиц меди для SDG типа "штырь-к-

пластине". (е) ПЭМ-изображение частиц меди для RR-SDG. (f) Распределение частиц меди по размерам

. Перепечатано с разрешения Han et al. (2012). Авторское право © 2012, Elsevier. Цветную версию смотрите в разделе "Таблички".

соответствует всем требованиям. Заряженные монодисперсные аэрозольные наночастицы осаждаются на поверхность, обработанную фоторезистом (PR), при этом ионы той же полярности вводятся в камеру осаждения в присутствии приложенного электрического поля. Ионы накапливаются на PR, изменяя приложенное поле для создания наноскопических электростатических линз, которые фокусируют наночастицы на открытых участках поверхности. Было продемонстрировано, что метод может с высокой скоростью создавать рисунки высокого разрешения как на проводящих (p-тип кремний), так и на непроводящих (диоксид кремния) поверхностях. Более того, размеры элементов в паттернах наночастиц значительно меньше, чем в исходном паттерне PR (рис. 12.23).

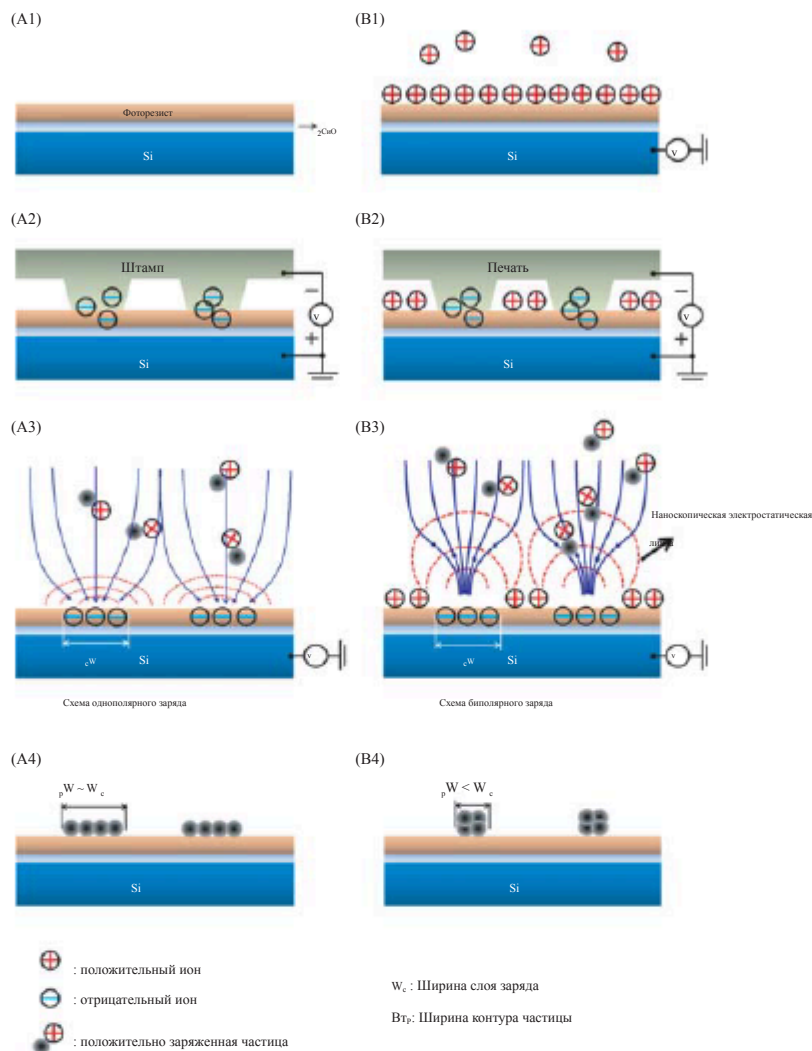


Управление фокусировкой с увеличением N_s скорость потока ионов на подложке с Рисунок 12.23 диаграммы PR шириной 230 нм и толщиной 135 нм. Масштабные линейки составляют 100 нм. (a) Осаждение частиц без инжекции ионов. (b - d) Осаждение частиц с помощью ионной инжекции: (b) 3 л/мин (концентрация ионов-тион, $N_s = 3.31 \times 10^5$ см), массив³ частиц длиной 100 нм, состоящий из частиц Ag длиной 10 нм; (c) 4 л/мин ($N_s = 4.73 \times 10^5$ см), 75-нм матрица из 10-нм частиц Ag; (d) 6 л/мин ($N_s = 6.13 \times 10^5$ см), 35-нм матрица из 10-нм частиц Ag. Адаптировано с разрешения Kim. et al. (2011).

Успешный подход (Ким *et al.*, 2006) привело к разработке наноксерографии с использованием чередующихся биполярных диаграмм поверхностного заряда (Lim *et al.*, 2012). Биполярные зарядовые структуры формируются путем сначала равномерного нанесения положительных ионов на поверхность диэлектрика, а затем переноса отрицательных зарядов через конформный контакт проводящего штампа при заданном потенциале. В отличие от обычного папохерографу которая использует однополярный заряд ПЭТ-краски, понятие (Лим *et al.*, 2012) генерирует эквипотенциальные плоскости выпуклой формы с большой кривизной, которые могут действовать как наноскопические электростатические линзы (рис. 12.24).

Через эти линзы положительно заряженные аэрозольные наночастицы фокусируются в центральной области диаграммы направленности отрицательного поверхностного заряда, что приводит к значительному уменьшению ширины осаждения частиц. Кроме того, область положительного поверхностного заряда создает отталкивающее поле, которое может предотвращать осаждение шумовых частиц. Способностью фокусировки можно управлять, изменяя скорости потока ионов. Для подтверждения экспериментальных результатов было проведено численное моделирование траектории и осаждения заряженных частиц. Отталкивающий компонент является формообразующим для осадка (Kim *et al.*, 2006; Ли *et al.*, 2011) и может управляться с помощью плотности положительного заряда. Для любой заданной отрицательной плотности заряда (привлекательной для положительных наночастиц) и для заданных размеров исходного ксерографического рисунка всегда можно найти некоторую критическую плотность положительного заряда, ниже которой происходит осаждение определенного размера, а выше которой осаждения вообще нет (все наночастицы отталкиваются). Изменяя плотность заряда ниже ее критического значения, можно сфокусировать размер элемента наноксерографии, как показано на рис. 12.24, от начального размера рисунка до разрешения размером в одну наночастицу.

Можно создавать массивы трехмерных структур из наночастиц путем инжекции как ионов, так и заряженных аэрозолей под действием заданного электрического поля в камеру, содержащую предварительно нанесенную PR кремниевую подложку. Ионное осаждение на поверхность PR создает наноскопический электростатический эффект



Принципиальная схема традиционной и современной наноксерографии. (A1) Рисунок 12.24

Подготовлена подложка с непроводящим полимерным покрытием. (A2) Проводящий штамп входит в контакт с поверхностью PR, и отрицательные заряды передаются на PR. (A3, A4) Благодаря кулоновской силе, наночастицы притягиваются к области структуры отрицательного поверхностного заряда. (B1) Положительные ионы осаждаются на поверхности PR. (B2) Предварительно нанесенный штамп с металлическим покрытием контактирует с поверхностью PR и передает на PR отрицательные заряды, которые заменяют положительные ионы в зоне контакта. (B3) Положительно заряженные частицы фокусируются к центру отрицательно заряженной поверхности с помощью наноскопической электростатической линзы, индуцируемой изменением биполярных поверхностных зарядов. (B4) Размеры рисунка наночастиц значительно уменьшены по сравнению с исходными рисунками отрицательного заряда. Перепечатано с разрешения Lim. et al. (2012). Авторское право © 2012, Американский институт физики. Цветную версию смотрите в разделе "Табличка".

линза, которая параллельно фокусирует заряженные наночастицы в центр открытого пространства внутри каждого PR рисунка; это принцип ионно-индуцированной фокусировки (Kim *et al.*, 2006) используется на ранней стадии роста. Ионы, накапливающиеся на поверхности PR, создают электрическое поле, которое отражает поступающие наночастицы от поверхности PR и, таким образом, предотвращает их осаждение на ней. Это отталкивающее электрическое поле образует своего рода электрический каркас, в который не могут проникнуть заряженные наночастицы. Действие электрического поля играет Критическую роль в определении 3D наночастиц структуры. Кроме того, усиленное поле вблизи поверхности растущей структуры наночастиц, которое определяется здесь как антенный эффект, играет роль в построении трехмерной структуры наночастиц (рис. 12.25).

Конфигурация искрового разряда (см. рис. 12.26) отличается от обычной разрядной камеры типа "от стержня к стержню", и эта конструкция (Nap *et al.*, 2012) имеет решающее значение для получения наночастиц меньшего размера, необходимых для создания стабильных 3D-наноструктур.

Примечательно, что форма трехмерной структуры наночастиц полностью отличается от формы ее корня; например, форма четырехлистного клевера, показанная на рис. 12.27а, отличается от формы корня квадрата. При ионно-индуцированного ориентируясь не могу объяснить это, electrical эшафот эффект, вызванный отражении электрического поля от PR поверхности играет важную

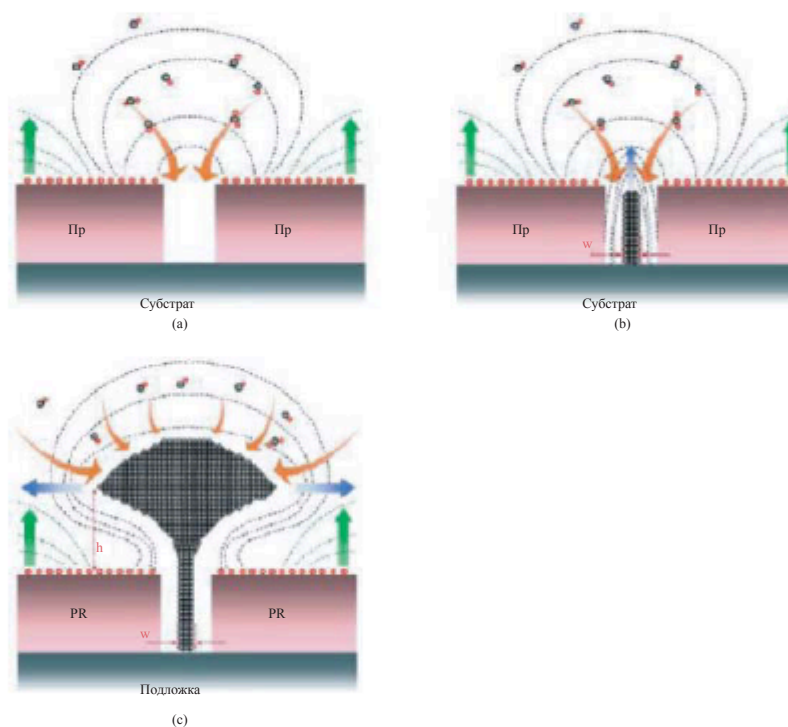
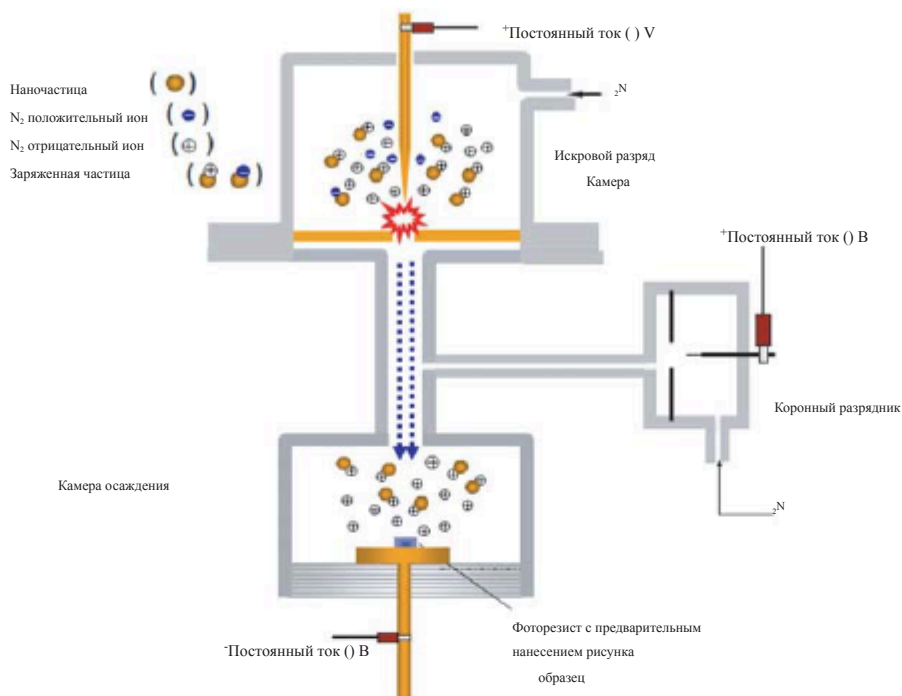


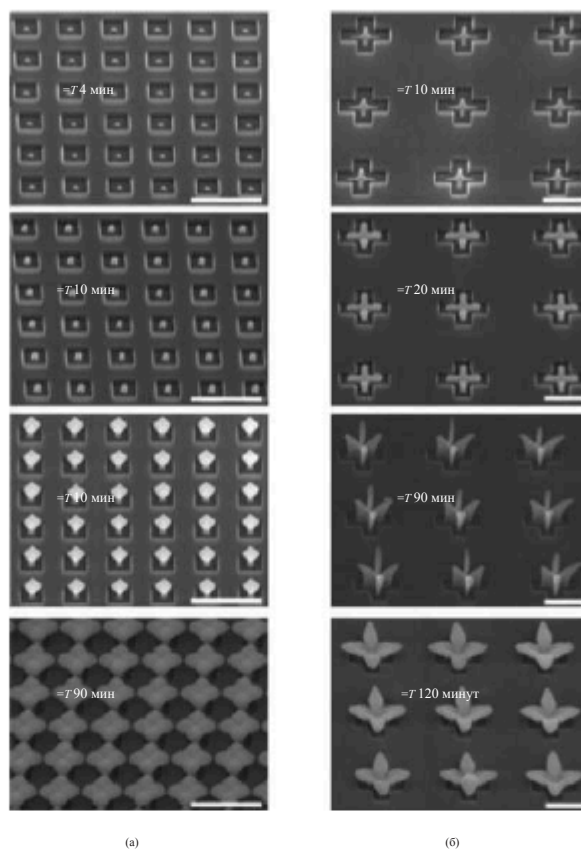
Схема трехмерной сборки наночастиц. (а) ионно-индуцированный электродинамический фокусировка направляет заряженные наночастицы в центральную область открытой кремниевой подложки. (b) Вертикальный рост наноструктуры в PR-схеме вызван ионно-индуцированной фокусировкой и эффектом антенны. (c) Дальнейший рост в боковом направлении является результатом усиленного антенного эффекта вблизи боковой поверхности 3D-структуры из наночастиц. Поле отталкивания показано на PR-поверхности. Перепечатано с разрешения Ли et al. (2011). Авторское право © 2011, Американское химическое общество. Цветную версию смотрите в разделе "Табличка".



Экспериментальная установка для генерации и осаждения заряженных наночастиц **Рисунок**

12.26 с помощью искрового разряда. Заряженные наночастицы и ионы с преимущественно положительным зарядом генерируются, когда на контактный электрод подается положительное напряжение, а плоский электрод заземлен. Они подаются в камеру осаждения со скоростью потока N_2 4 л/мин. К подложке прикладывается 4 кВ отрицательный потенциал, чтобы притянуть к ней ионы и заряженные наномассивные частицы. Следовательно, только положительно заряженные ионы и наночастицы движутся к подложке, и небольшая часть ионов и частиц с отрицательным зарядом не может быть осаждена на ней. Коронный разрядник обеспечивает выделение положительных ионов N_2 , которые накапливаются на поверхности PR перед нанесением. Ионы накапливаются на поверхности PR вдоль линии электрического поля и образуют ионно-индуцированную электростатическую линзу. Заряженные наночастицы сходятся с помощью линзы и размещаются в нужном положении на подложке. По мере увеличения времени нанесения различные 3D-структуры наночастиц, такие как полусферы, столбики, грибы и четырехлистные клевера, получаются из исходного квадратного PR-рисунка шириной 500 нм (рис. 12.27а), а 3D-структуры наночастиц, такие как 3D-кресты и цветы, получаются из исходного крестообразного PR-рисунка с одной стороной 500 нм (рис. 12.27б). Как было замечено ранее, на 4-й минуте, наночастицы сходятся только в центральной области PR рисунка из-за ионно-индуцированной фокусировки, упомянутой ранее (см. Рис. 12.27а). Перепечатано с разрешения Ли et al. (2011). Авторское право © 2011, Американское химическое общество. Цветную версию смотрите в разделе "Табличка".

роль в определении общей формы трехмерной структуры наночастиц. Обратите внимание, что чистый рост лапласа препятствует закрытию зазора между структурными элементами, однако "лепестки" через 90 минут на рис. 12.27а почти соприкасаются друг с другом из-за осаждения тех наночастиц, которые движутся в баллистическом режиме, отклоняясь, таким образом, от линий поля Лапласа. Можно увидеть условия нанесения, при которых 3D-сеть в конечном итоге будет полностью подключена.

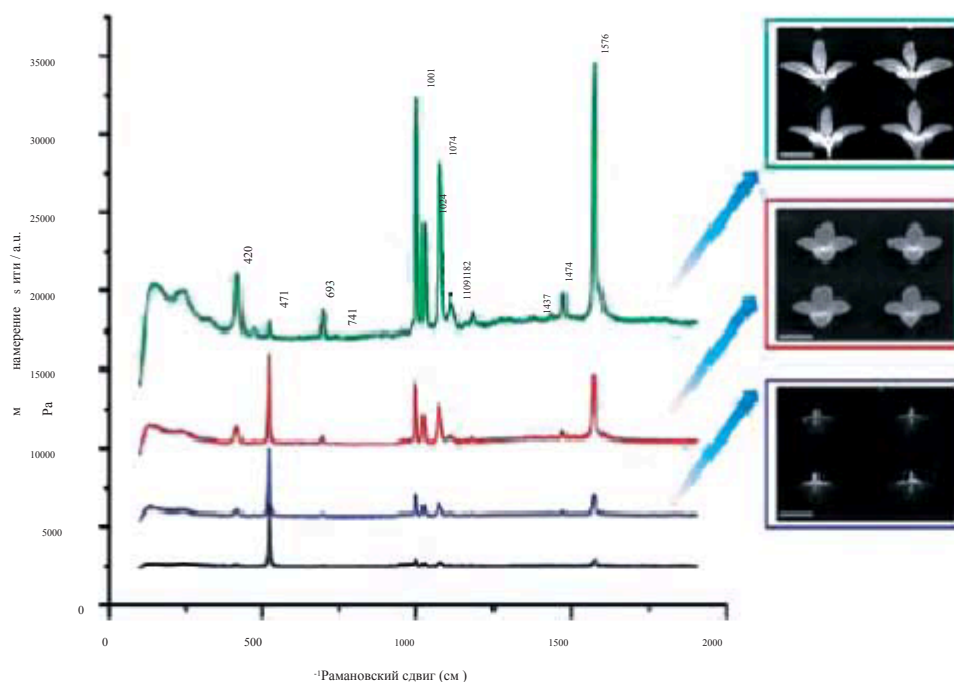


Зависящий от времени рост массивов трехмерных структур наночастиц. Комбинация Рисунок 12.27 в качестве Ион-наведенный помост и антенный эффект понимает селективного формирования 3D папорот- ст. структура массивов на пиар-картины. Массивы трехмерных наночастиц, состоящие из наночастиц меди, сформированы в виде (а) прямоугольных рисунков с одной стороной 500 нм для нанесения раз в 4, 10, 40, и 90 минут и (б) перекрестные рисунки PR с одной стороной 500 нм для 10, 20, 90 и 120 минут. Все шкалы равны 1,5 μ m. Перепечатано с разрешения Ли et al. (2011). Авторское право © 2011, Американское химическое общество.

Тот факт, что наноструктура flower является проводящей, демонстрирует несколько плазмонных эффектов, возникающих в результате резонансных коллективных электронных волн, индуцируемых внешним электро- магнитным полем света. Одним из них является хорошо известное комбинационное рассеяние света с поверхностным усилением (SERS), при котором резонансные плазмоны усиливают локальные электрические поля, действующие на молекулы, лежащие на поверхности, и, таким образом, делают возможной диагностику молекул при чрезвычайно низкой концентрации молекул.

Для того, чтобы включить рамановские измерения (Lee et al., 2011), подложки SERS с 3D рисунком погружали в 10^{-3}

Растворяют тиюфенол в этаноле (Олдрич) в течение 3 часов, а затем сушат в течение нескольких минут. Спектры комбинационного рассеяния света были получены с помощью конфокального рамановского микроскопа модели LabRam HR с многоканальным детектором устройства с зарядовой связью (CCD) с LN -охлаждением. - тог (Жобен-Ивон, Франция). В качестве источника возбуждения использовался ионно-аргоновый лазер с длиной волны 514 нм, средний размер пятна которого составлял приблизительно 700 нм. Мощность лазера излучается в



М-этанольный раствор тиофенола на композите Рисунок 12.28 Спектры

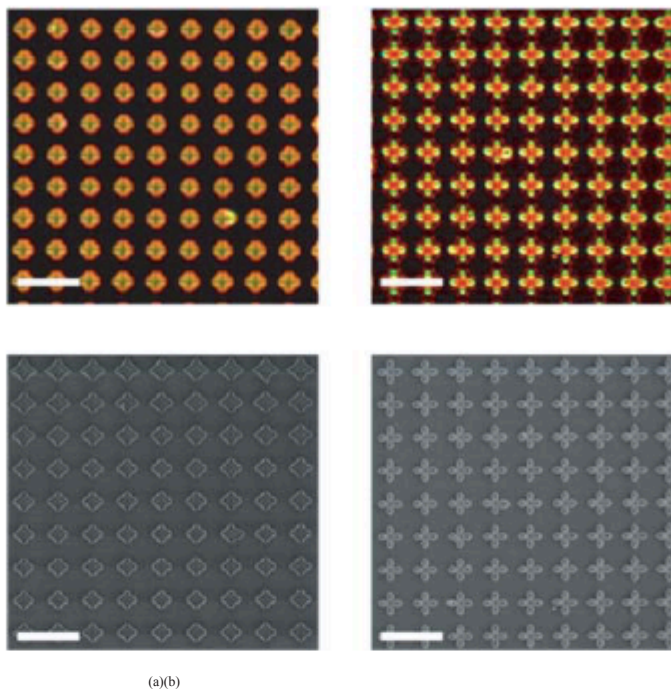
комбинационного рассеяния света 10 образцов структуры наночастиц, состоящих из наночастиц меди и серебра, по сравнению со спектрами комбинационного рассеяния света 2D-плоской структуры наночастиц Ag, нанесенных на подложку Si. Композитные 3D-структуры из наночастиц были получены путем накопления наночастиц серебра на структурах из наночастиц меди, изготовленных с разным временем нанесения (верхняя коробка: 20 минут для меди и 30 минут для серебра; средняя коробка: 60 минут для меди и 60 минут для серебра; нижняя коробка: 90 минут для меди и 90 минут для серебра). Нижняя кривая показывает случай использования плоских 2D-шаблонов. Перепечатано с разрешения Lee. et al. (2011). Авторское право © 2011, Американское химическое общество.

мощность образца составляла около 0,02 МВт, а время сбора данных составляло 100 секунд. На рисунке 12.28 показано увеличение интенсивности сигнала в 17 раз и улучшение качества рамановского сигнала, которые позволяют различать скрытые спектральные особенности.

Другим плазмонным эффектом является перераспределение спектральной интенсивности белого света, рассеянного плазмонной структурой. Такое рассеяние отвечает за окраску крыльев бабочки.

Его можно измерить в конфигурации темно-полевой микроскопии, где обнаруживается только спектр рассеянного света без какого-либо фонового белого света (Lee et al.,

2011). В одном эксперименте микрофотографии в темном поле были получены с помощью ПЗС-камеры true-color (DP72, Olympus), установленной непосредственно на обычный микроскоп с отраженным светом (BX51, Olympus), в котором в качестве источника освещения белым светом использовалась галогенная лампа мощностью 100 Вт. Для получения изображений в темном поле использовался 100-кратный затемненный объектив в сочетании с кольцевым зеркалом, которое отделяло траекторию луча освещения от траектории луча обнаружения. В режиме съемки в темном поле через объектив проходил только рассеянный свет, который направлялся на ПЗС-камеру для получения изображения.



Изображение рассеяния в темном поле (вверху) и сканирующая электронная микроскопия (SEM) **Рисунок 12.29** изображение (внизу) (а) покрытых наночастицами серебра и (б) покрытых пленкой золота 3D-матрицы структуры наночастиц меди. Масштабная шкала равна 5 μm . Перепечатано с разрешения *Li et al. (2011)*. Авторское право © 2011, Американское химическое общество. Цветную версию смотрите в разделе "Табличка".

Цвета цветочных лепестков обусловлены исключительно плазмонными модами, генерируемыми в этом наноструктурированном металле (рис. 12.29). Сильное взаимодействие между составляющими наночастицами создает практически однородную металлическую структуру с собственными характерными плазмонными модами, которые отражают четырехкратную симметрию цветка и придают ему красочную красоту.

12.9 Выводы

Аэрозольный синтез оказался эффективным методом для ряда наноструктурированных материалов. Первичные наночастицы образуются в очень дисперсной фазе и могут быть направлены в любую полезную структуру, будь то обычное нанесение на подложку или какое-либо сложное нанесение рисунка и сборка. Внутренние свойства наночастиц могут быть своеобразными сами по себе и отличаться от свойств, проявляемых теми же материалами в объемных фазах. Дополнительные неоднородности, такие как допинг, лаков, составление/сборка, создает меха- там потенциал для манипулирования этими свойствами. Из-за бесчисленных контактов между наночастицами в материале такой наноструктурированный конденсированный материал может обладать дополнительными особенностями, такими как высокая чувствительность к окружающей среде и специфическая реакция на перенос электронов, а также электрические и магнитные поля.

Список литературы

- Алиев Ф.Г., Корреа-Дуарте М.А., Мамедов А. *et al.* (1999) Послойная сборка наночастиц магнетита ядро-оболочка: влияние кремнеземного покрытия на межчастичные взаимодействия и магнитные свойства. *Современные материалы.*, **11**, 1006-1010.
- Альтман И.С., Пихица П.В. и Чой М. (2004а) Электронная полевая эмиссия наноуглеродов: двухпроцессорная модель. *Письма по прикладной физике*, **84**(7), 1126 - 1128.
- Альтман И.С., Пихица П.В. и Чой М. (2004b) Двухпроцессорная модель электронного поля эмиссии наноуглеродов: температурный эффект. *Журнал прикладной физики.*, **96**(6), 3491 -3493. Альтман И.С.,
- Пихица П.В., Чонг Дж.И. *et al.* (2003) Линейчатые спектры легированного нанооксида: дизайн для нанооптики. *Письма по прикладной физике*, **83**(18), 3689 - 3691.
- Бискос Г., Вонс В., Юртери К. и Шмидт-Отт А. (2008) Генерация и определение размера аг-материалы для нанотехнологий на основе аэрозолей. *Журнал Учета частиц порошка KONA*, **26**, 13- 35.
- Борра Дж., Голдман А., Голдман, М. и Boulaud, Д. (1998) режимы электроэрозионной и аэрозольного производства в точке к плоскости постоянного тока высокого давления холодной плазмы: аэрозоль про- изводства за счет электрических разрядов. *Научный журнал по аэрозолям*, **29**, 661 -674.
- Браунинг Д.Дж., Джеррард М.Л., Лейкман Дж.Б. *et al.* (2002) Исследования накопления водорода в углеродных нановолокнах: предложение о возможном механизме реакции. *Нанолитература*, **2**, 201 - 205.
- Чой М., Альтман И.С., Ким Ю. *et al.* (2004) Образование углеродных нанопарков в форме оболочки-превышает критическую мощность лазера в облученном ацетилене. *Современные материалы*, **16**, 1721-1725. Дютуа,
- Д.К.М., Шнайдер, М. и Байкер, А. (1995) Смешанные оксиды титана и кремнезема: I. Влияние-влияние золь-гель условий и условий сушки на структурные свойства. *Журнал катализа.*, **153**, 165- 176. Хан К., Ким
- У., Ю, Дж. *et al.* (2012) Исследование генератора искрового разряда типа "штырь-пластина" для получения неагломерированных наноаэрозолей. *Научный журнал по аэрозолям.*, **31**(10), 1145 -1163.
- Ким Х., Ким Дж., Янг Х. *et al* (2006) Параллельное формирование структуры наночастиц с помощью электродиагностики.- динамическая фокусировка заряженных аэрозолей. *Природные нанотехнологии*, **1**, 117 - 121.
- Ким Д., Пихица П.В., Янг Х. и Чой М. (2011) СО и Н при комнатной температуре, sens-обработка углеродными наночастицами. *Нанотехнологии*, **22**, 485501.
- Кринке, Т.Дж., Депперт, К., Магнуссон, М.Х. *et al.* (2002) Микроскопические аспекты осаждения образование наночастиц из газовой фазы. *Научный журнал по аэрозолям.*, **33**, 1341 - 1359.
- Ли Д. и Чой М. (2000) Контроль размера и морфологии наночастиц с использованием СО₂ лазер в процессе синтеза пламенем. *Научный журнал по аэрозолям.*, **31**(10), 1145 -1163.
- Ли Д. и Чой М. (2002) Коалесценция улучшает синтез наночастиц для контроля размера, морфологии и кристаллической фазы при высоких концентрациях. *Научный журнал по аэрозолям- епсе*, **33**, 1-16. Ли Д.,
- Янг С. и Чой М. (2001) Контролируемое образование наночастиц с использованием лазерное излучение в пламени и его характеристики. *Письма по прикладной физике*, **79** (15), 2459 -2461.
- Ли, Х., Ты, С., Пихица, П.В. *et al.* (2011) Трехмерная сборка наночастиц из заряженных аэрозолей. *Нанобуквы*, **11**, 119 -124.

- Лим, К., Ли, Дж., Ли, Х. *et al.* (2012) Наноксерография с использованием моделей биполярного заряда. *Письма по прикладной физике*, **101**, 203106.
- Накасо, К., Хан, Б., Ан, К. *et al.* (2003) Синтез неагломерированных наночастиц методом химического осаждения из паровой фазы с помощью электрораспыления (ES-CVD). *Журнал Наука об аэрозолях*, **34**, 869 - 881.
- Насибуллин А.Г., Пихица П.В., Цзян Х. *et al.* (2007) Новый гибридный углеродный материал. *Природные нанотехнологии*, **2**, 156-161.
- Пихица, П.В., Ким, Ю.Дж., Ким, М.В. *et al.* (2005) Оптические проявления конденсата-исследование топологических дефектов в сплошных многослойных углеродных наночастицах. *Физический обзор В*, **71**, 073402; Пихица П.В., Ким Д. и Чой М. Реакции, управляемые лазером CO в потоке чистого ацетилена, arXiv: 109.3331.
- Пихица П.В., Ким Д. и Чой М. (2011) Ацетилен и этилен, разбавленные азотом / аргонном голубое пламя под инфракрасным излучением CO₂ лазерное облучение. *Достижения AIP*, **1**, 032142.
- Пихица, П.В., Янг, С., Ким, Дж. *et al.* (2007) Быстрая фрагментация наночастиц оксида металла-достигается за счет восстановления в кислородно-водородном пламени. *Письма по прикладной физике*, **90**, 163106.
- Працинис, С. Э. (1998) Пламенно-аэрозольный синтез керамических порошков. *Прогресс в энергетике и Наука о горении*, **24**, 197 - 219.
- Псофоганнакис, Г.М. и Фрудакис, Г.Э. (2009) Исследование накопления водорода методом DFT путем вторичного распространения на графите с поверхностными группами кислорода. *Журнал Американского химического общества*, **131**, 15133- 15135.
- Сантра, С., Тапек, Р., Теодоропулу, Н. *et al.* (2001) Синтез и характеристика наночастицы оксида железа, покрытые кремнеземом, в микроэмульсии: влияние неионных поверхностно- активных веществ. *Ленгмюра*, **17**, 2900 - 2906.
- Шмидт-Отг, А. (2011) Аэрозольные методы синтеза и определения характеристик наночастиц, в *Справочнике по нанофизике, принципам и методам* (ред. К.Д. Саттлер), глава 30, CRC Press, Нью-Йорк, стр. 1-19. Селван С.Т., Тан Т.Т. и Ин Дж.Й. (2005) Надежный, нецитотоксичный CdSe, покрытый кремнеземом. *Современные материалы*, **17**, 1620 - 1625.
- квантовые точки с эффективной фотолюминесценцией. *Современные материалы*, **17**, 1620 - 1625.
- Шин С., Янг С., Джун К. и Чой М. (2009) Одностадийный пламенный метод синтеза композитных наночастиц с покрытием. *Журнал исследований наночастиц*, **11**, 1767 - 1775.
- Шин С., Янг С., Цзюнь К. *et al.* (2012) Контроль кристалличности композита, созданного в пламени. наночастицы с помощью лазерного излучения. *Порошковая технология*, **229**, 246 - 252.
- Старк, У.Дж. и Працинис, С. Э. (2002) Реакторы с аэрозольным пламенем для производства наночастиц- ticles. *Порошковая технология*, **126**, 103- 108.
- Тебризи, Н., Ульман, М., Вонс, В. *et al.* (2009) Генерация наночастиц с помощью искрового разряда- *Журнал исследований наночастиц*, **11**, 315-332.
- Тада К., Фуруя С. и Ватанабэ К. (2001) *Изначально* исследование адсорбции водорода на одностенных углеродных нанотрубках. *Физический обзор В*, **63**, 155405.
- Телеки, А., Сутер, М., Кидамби, П.Р. *et al.* (2009) Суперпарамагнит с герметичным покрытием Fe₂ O₃ частицы с SiO₂ напыления. *Химия материалов*, **21**, 2094 -2100.
- Вайтай, Р., Вэй, Б.К., Чжан, З.Дж. *et al.* (2002) Создание углеродных нанотрубок и их интеллектуальных архитектуры. *Интеллектуальные материалы и структуры*, **11**, 691 - 698.
- Вемури С., Працинис С. Е. и Кибби Л. (1997) Электрически управляемый пламенный синтез нанофазного TiO₂, SiO₂, и SnO₂ порошки. *Журнал исследований материалов*, **12**(4), 1031- 1042.

- Воллат Д. и Сабо Д.В. (2004) Синтез и свойства нанокompозитов. *Дополнительно Инженерные материалы*, 6, 117-127.
- Янг, С., Чан, Ю., Ким, К. *et al.* (2010) Метод пламенного сжигания металла для производства наночастиц. *Порошковая технология*, 197, 170 - 176.
- Ян, С., Йи, Дж., Сын, С. *et al.* (2003) Фрагментация Fe, O₃ наночастицы, приводимые в движение фазовые переходы в пламени и их магнитные свойства. *Письма по прикладной физике*, 83, 4842-4844. Чжу,
- З.Х., Финнерти, Дж., Лу, Дж.К. *et al.* (2002) Расчеты теории молекулярных орбиталей для H₂ Реакция О-углерода. *Энергетическое топливо*, 16, 847-854.

Безопасность появляющихся неорганических и углеродных наноматериалов

Л. Рейндерс

IBED, Амстердамский университет, Нидерланды

13.1 Введение

наночастицах часто определяется как имеющий одно измерение (Фубини, Гиацца и Фенолио, 2010; Обердерстер, 2010; Кушен *et al.*, 2011; Мейнард, Вархайт и Филберт, 2011). Такие наноматериалы, может возникнуть естественный ори-Джин, как на примере наночастиц сульфидов ртути (Чжан *et al.*, 2012). Они могут присутствовать в обычных материалах, таких как технический углерод и добавки к краскам, такие как карбонат кальция и тальк, а также в выбросах при сжигании топлива (Кунцли, 2011; Рейндерс, 2012; ван Брукхейзен., 2012). Они также могут быть получены из обычных материалов в условиях окружающей среды, примером чего является образование наночастиц Cu и Ag из серебряных и медных предметов, подвергнутых воздействию жидкой воды или влажности (Гловер, Миллер и Хатчисон, 2011). Кроме того, наночастицы могут образовываться при сварке (Даш и Д'Арси, 2008). Износ и обработка обычных материалов также могут приводить к высвобождению наночастиц. Например, работающие электродвигатели могут выделять наночастицы Меди, а обработка алмазов может привести к образованию углеродных наночастиц (Scymczak, Menzela, and Keska, 2007; Бенивал и Шивготра, 2009).

Неорганические и углеродсодержащие наночастицы также все чаще разрабатываются для различных применений. Это новые наноматериалы, из которых здесь будут рассмотрены стойкие искусственно созданные неорганические и углеродные наночастицы..... В этом контексте, по- sistent относится к наночастицам, которые плохо растворимы или нерастворимы в воде. Примеры новых стойких инженерных неорганических и углеродных наноматериалов приведены во вставке 13.1.

Вставка 13.1 Примеры новых стойких неорганических и углеродных наноматериалов, в настоящее время разрабатываемых для практического применения (Wynne *et al.*, 2008; Питерс *et al.*, 2009; Феррейра, Фильо и Алвес, 2010; Вон, Нерсисян и Вон, 2010; Кушен *et al.*, 2011; Reijnders, 2012)

Элементы:

Ag Gd

Au La

C (нанотрубки, фуллерены, графен Mn

нанопластинки,

наночастицы углеродной сажи)

Fe

Pb

Pt и родственные металлы платины

Группа

Оксиды, гидроксиды и нитриды:

${}^2_{\text{Al}} \text{O}_3$

${}^2_{\text{CuO}}$ Генеральный директор

${}^2_{\text{CuO}}$ Главный операционный директор

$\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Fe}_3\text{O}_4$

MnO

${}^2_{\text{Ni}}(\text{OH})$

${}^2_{\text{Sc}} \text{O}_3$

${}^2_{\text{C}} \text{O}_5$

${}^2_{\text{Si}} \text{O}$

${}^2_{\text{B}} \text{O}_5$

${}^2_{\text{ZnO}}$

Олово ZnO

Другое:

Глины (например,

монтмориллонит) CdSe

CdTe Титанат лития

SiC

${}^3_{\text{Sc}} \text{NC}_{80}$

Силикатные

нанопластинки ${}^2_{\text{SnS}}$

WC

ZnS

Для реальных применений стойкие инженерные неорганические и углеродные наночастицы, упомянутые во вставке 13.1, могут подвергаться модификации поверхности, включая функционализацию, укупорку и нанесение покрытия (например, Zhang, Su, and Mao, 2006; Jeong 2009; Ma *et al.*, 2010; Шефер-Перикас, Макьера и Пучадес, 2011; Тию *et al.*, 2011; Piccapietra, Sigg и Behra, 2012; Rivet *et al.*, 2012).

Сконструированные наночастицы могут попадать в рабочую среду и более широкую среду во время производства, промышленного обращения и применения таких наночастиц (Kuhlbusch *et al.*, 2011; van Broekhuizen and Reijnders, 2011). Некоторые инженерные наноматериалы обладают

диспергирующие применения в потребительских товарах, включая аэрозольные баллончики, а также в лекарствах и топливе (Рейндерс, 2008; Квадрос и Марр, 2011; Рейндерс, 2012). Использование таких продуктов может привести к воздействию на человека появляющихся наночастиц. Применение в топливных, потребительских продуктах и лекарствах также может привести к выбросам в окружающую среду (например, Мюллер и Новак, 2008; Готтшалк *et al.*, 2010; Квадрос и Марр, 2011). Наночастицы

кроме того, могут быть удалены из продуктов, на которых они установлены или в которые они встроены (например, Benn and Westerhoff, 2008; Mueller and Nowack, 2008; Wohlleben .,

et al

2011). Примерами этого являются выпуск TiO_2 из полимерных матриц, связанных с разложением полимера (Воллебен *et al.*, 2011) и высвобождение наночастиц Ag из текстильных тканей (Бенн и Вестерхофф, 2008). В случае пожаров выброс мелких частиц из замедляющих горение нанокompозитных полиамида 6 и полипропилена может быть увеличен, если сравнивать с первичными полимерами (Rhodes, Smith, and Stec, 2011).

Выброс образующихся наночастиц в окружающую среду может привести к облучению людей и других организмов. В связи с этим возникает вопрос безопасности. Безопасность стойких неорганических и углеродных наноматериалов изучена в ограниченной степени. Частично это следует из давнего и широко распространенного предположения, что опасность (потенциальный вред) и риск (вероятность причинения вреда) не зависят от размера частиц (Мейнард *et al.*, 2011). В настоящее время известно, что это предположение неверно для многих стойких искусственных неорганических и углеродных наночастиц (Oberdörster, 2010; Эльзаесер и Ховард, 2011; Мейнард *et al.*, 2011).

Имеющиеся исследования, касающиеся безопасности новых наноматериалов, в основном были сосредоточены на стойких инженерных наночастицах, у которых отсутствует обработка поверхности, такая как функционализация или покрытие. Они рассмотрели риски, связанные с наноматериалами, и опасности, связанные с токсичностью для человека и экотоксичностью. Могут существовать и другие опасности, связанные с использованием искусственных наноматериалов; широкое применение наночастиц Ag может привести к появлению повышенной устойчивости опасных микробов к Ag, что, в свою очередь, может затруднить борьбу с инфекциями человека (Silver, 2003; Silver, Phung, and Silver, 2006). Кроме того, большие сбросы наночастиц Ag, CuO и ZnO могут негативно влиять на очистку сточных вод, приводя к повышению уровня опасных веществ в поверхностных водах (Луна-делРиско, Оруполд и Дюбургье, 2011; Шэн и Лю, 2011).

Относительно большое количество исследований, связанных с безопасностью, изучало связь между воздействием стойких неорганических и углеродных наночастиц при вдыхании и здоровьем человека (Oberdörster, 2010; Maynard *et al.*, 2011; Песня *et al.*, 2011; Деревенщина и Макфейл, 2011).

Однако, сведения об опасности и воздействии на эти ВДВ наночастицы еще фрагментарны, из которой следует, что риск оценки являются весьма неопределенными (Oberdörster, 2010; Kuhlbusch *et al.*, 2011; Мейнард *et al.*, 2011; Пол *et al.*, 2011; Стебунова *et al.*, 2011; Деревенщина и Макфейл, 2011). Кроме того, в воздухе могут быть взаимодействия первичных наночастиц и веществ и других частиц, которые могут привести к образованию ассоциаций или вторичных частиц (агрегатов и агломератов), обладающие опасными свойствами довольно дифференциальным у исходных наночастиц (Kreyling *et al.*, 2009; Ланкофф *et al.*, 2012).

Исследования, касающиеся опасностей для здоровья человека и рисков других видов воздействия на человека, таких как проглатывание, были более фрагментарными, чем исследования, касающиеся вдыхания (Рейндерс, 2012). Исследования экотоксичности инженерных наночастиц, упомянутых во вставке 13.1, были более ограниченными, чем изучение опасностей и рисков, связанных со здоровьем человека (Бхатт и Трипати, 2011; Менар, Дробне и Джебек, 2011; Турко *et al.*, 2011; Петерсен *et al.*, 2011). Более того, взаимодействия в окружающей среде могут приводить к образованию широкого спектра ассоциаций и продуктов конверсии, отличающихся экотоксичностью от исходных наночастиц (Ауффан *et al.*, 2010; Чиннапонгсе, Маккаспи и Хэкли, 2011; Менард *et al.*, 2011; Турко *et al.*, 2011; ван Хукке *et al.*, 2011; Мудункотува, Петтибоун и Грассиан, 2012; Новак *et al.*, 2012).

В этой главе исследования об отношении между вдыханием воздействия пыли- loaded стойких неорганических и углеродных наночастиц и здоровье человека будет сначала summarized. Затем будут рассмотрены меры, способствующие обеспечению безопасности с учетом опасности и потенциального воздействия таких переносимых по воздуху наноматериалов, особенно на рабочем месте. За вдыханием наночастиц может последовать выведение вдыхаемых наночастиц из легких, и впоследствии это может привести к проглатыванию (Sturm, 2007; Sturm and Hofmann, 2009; Beamish, Osornio-Vargas, and Wine, 2011). Таким образом, также будет проведен краткий обзор исследований, касающихся безопасности использования наночастиц. Наконец, будут рассмотрены исследования экотоксичности, относящиеся к новым устойчивым неорганическим и углеродным наноматериалам.

13.2 Здоровье человека и стойкие к Вдыханию Инженерные неорганические и углеродные наноматериалы

Вдыхаемые первичные стойкие неорганические и углеродные наночастицы могут проникать глубоко в легкие и откладываться там (Oberdörster, 2010; Maynard *et al.*, 2011). Выведение таких частиц из легких происходит, но может быть частичным (Oberdörster, 2010; Maynard *et al.*, 2011). Нанесенные стойкие первичные неорганические и углеродные наноматериалы могут быть опасными (Fubini *et al.*, 2010; Oberdörster 2010; Maynard *et al.*, 2011; Паур *et al.*, 2011; Йокель и Макфейл, 2011), их воздействие на дыхательную систему, включая воспаление, гранулемы, фиброз и рак (Peters). *et al.*, 2009; Oberdörster, 2010; Maynard *et al.*, 2011; Деревенщина и Макфейл, 2011). Вдыхаемые первичные наночастицы могут переноситься из дыхательной системы в зависимости от таких факторов, как размер, форма и поверхностный заряд (Choi) *et al.*, 2010; Фубини *et al.*, 2010; Oberdörster, 2010; Aschberger *et al.*, 2011; Ким *et al.*, 2011; Мейнард *et al.*, 2011; Йокель и Макфейл, 2011), например, к сердечно-сосудистой системе (Крейлинг *et al.*, 2002, 2009; Чой *et al.*, 2010). Это может привести к отложению наночастиц в органах, включая сердечно-сосудистую систему, печень, почки, селезенку, желудок, головной мозг и яички. Отложение наноматериалов в этих органах может вызвать воспаление, изменения иммунных реакций (иммуномодуляцию) и, в случае мозга, изменения уровней нейротрансмиттеров (Fubini *et al.*, 2010; Oberdörster, 2010; Hubbs *et al.*, 2011; Мейнард *et al.*, 2011; Деревенщина и Макфейл, 2011). Сообщалось также о перемещении наночастиц через плаценту и образовании активных форм кислорода вследствие передачи сигналов, индуцированных наночастицами, через плацентарный барьер (Брайдич-Столле *et al.*, 2010; Хоугаард *et al.*, 2010; Суд *et al.*, 2011; Чжан *et al.*, 2011a). Активные формы кислорода, в свою очередь, могут вызывать развитие токсичности для плода, повреждение ДНК плода и осложнения беременности (Брайдич-Столле *et al.*, 2010; Хоугаард *et al.*, 2010; Суд *et al.*, 2011; Чжан *et al.*, 2011a).

Кроме того, отложение наноматериалов в легких может привести к повышению уровня стрессоров, таких как цитокины и окисленные биомолекулы, в кровотоке и к изменениям в активности автономной нервной системы (Гомес-Меджиба *et al.*, 2009; Хори и Фудзита, 2011; Паур *et al.*, 2011). Последнее может инициировать нарушения сердечного ритма, в то время как первое может вызывать сердечно-сосудистые заболевания и хроническое воспаление в органах и влиять на развитие плода (Гомес-Меджиба *et al.*, 2009; Джексон *et al.*, 2011). Кроме того, вызванное наноматериалами воспаление легких может привести к образованию агрегатов тромбоцитов и лейкоцитов, которые были связаны с прогрессированием атеросклероза (Tabuchi and Kuebler, 2008).

Возможна также транслокация из области носа в головной мозг через обонятельный нерв и луковичу (Мейнард *et al.*, 2011). Это может привести к изменениям уровня нейромедиаторов и к усилению воспаления (Oberdörster, 2010; Hubbs *et al.*, 2011).

Стойкие неорганические и углеродные наноматериалы могут сильно различаться по воздействию при вдыхании. Например, C_{60} фуллерены гораздо менее опасны, чем длинные жесткие углеродные нанотрубки (Borm and Castranova, 2009). В результате имеющихся в настоящее время исследований выявлен ряд факторов, определяющих опасность и / или риски, связанные с постоянно создаваемыми неорганическими и углеродными наночастицами.

Первым важным фактором, определяющим опасность, является размер. Размер важен для таких характеристик, как проникновение в легкие, поглощение клетками, внутриклеточные взаимодействия и выведение (Крейлинг, 2002; Земмлер-Бенке *et al.*, 2008; Пелли, Даар и Санер, 2009; Чой *et al.*, 2010; Парк *et al.*, 2011). Например, нанодоты, покрытые циттеринным цистеином, имеют

было обнаружено, что быстро выводится при размерах $< \approx 5,5$ нм, тогда как выделение намного большего ≈ 100 нм (2009). Цитотоксичность частиц Au размером 1,4 нм имеет

было обнаружено, что он в шесть раз выше, чем у наночастиц Au размером 0,8, 1,2 и 1,8 нм (Aillon *et al.*, 2009). Размер первичных наночастиц также влияет на площадь поверхности (Рамачандран *et al.*, 2011; Клейн *et al.*, 2012), что является еще одним фактором, определяющим опасность.

Стойкие неорганические и углеродные наночастицы могут образовывать скопления в воздухе и в легких. Это может привести к изменению степени опасности для здоровья человека по сравнению с первичными частицами (например, опасность Клейн *et al.*, 2012). Однако есть признаки того, что может быть сохранена до такой степени, что площадь поверхности исходных наночастиц остается доступной для реакционной способности (Raboli *et al.*, 2011).

Характеристики поверхности являются важными факторами, определяющими опасность. Помимо площади поверхности, эти характеристики включают реакционную способность поверхности (например, образование активных форм кислорода и выделение токсичных веществ), поверхностный заряд и гидрофильность (по Даффину *et al.*, 2007; Limbach *et al.*, 2007; Monteiller *et al.*, 2007; Эйрес *et al.*, 2008; Клифт *et al.*, 2008; Хусейн *et al.*, 2009; Чой *et al.*, 2010; Марамбио-Джонс и Хук, 2010; Напьерска *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2008; Kayat *et al.*, 2011; Коикэ и Кобаяси, 2011; Рим *et al.*, 2011; Соенен *et al.*, 2011; Чжу *et al.*, 2011; Заклепка *et al.*, 2012). Например, при изучении наночастиц TiO и технического углерода Монтейлер *et al.* (2007) сообщил, что

токсичность для эпителиальных клеток варьировала в зависимости от площади поверхности. Choi *et al.* (2010) обнаружили, что поперечные наночастицы < 34 нм быстро перемещались из легких, тогда как катионные наночастицы аналогичного размера - нет. Это может означать, что некатионные наночастицы более опасны, чем катионные наночастицы, для органов, отличных от дыхательной системы. Выделение Ag из наночастиц Ag, Cd из наноточек CdSe и ионов Fe, Cu, Ni и Zn из наночастиц оксида металла являются факторами, определяющими опасность наночастиц (Пелли *et al.*, 2009; Марамбио-Джонс и Хук, 2010; Хори и Фудзита, 2011; Чжу *et al.*, 2011). Содержание и распределение силанолов на поверхности наночастиц SiO

было высказано предположение, что они являются основными факторами, определяющими опасность нанокремнезема (Napieriska *et al.*, 2010). Функционализация полидиметиламином сильно усиливает цитотоксическое действие наночастиц оксида железа на нейроны коры головного мозга (Rivet *et al.*, 2012).

Кроме того, форма, структура и жесткость могут иметь отношение к опасностям стойких неорганических и углеродных первичных наночастиц (Sayes, Reed, and Warheit, 2007; Borm and Castranova, 2009; Гамильтон *et al.*, 2009; Лонгмайр *et al.*, 2011; Напьерская *et al.*, 2010; Oberdörster, 2010; Maynard *et al.*, 2011; Reijnders, 2012). Есть некоторые свидетельства того, *ceteris paribus* Жесткие наноматериалы могут быть более опасными, чем гибкие наноматериалы.

(Рейндерс, 2012): кристаллический нанокремнезем, по-видимому, более опасен, чем аморфный наночастицы SiO (Napierska *et al.*, 2010) и, как упоминалось ранее, длинный углеродный нанотрубки, по-видимому, гораздо более опасны, чем фуллерены (C₆₀) (Борм и Кастранова, 2009). Было высказано предположение, что нарушение фагоцитоза является основной причиной различия между длинными углеродными нанотрубками и фуллеренами (Borm and Castranova, 2009): фуллерены гораздо легче удаляются макрофагами из легких, чем длинные углеродные нанотрубки (Borm and Castranova, 2009), а длинные углеродные нанотрубки, как правило, более цитотоксичны, чем фуллерены (Jia *et al.*, 2005). Нарушение фагоцитоза также было предложено в качестве причины относительно сильного воспалительного эффекта в легких и плевральной полости графеновых нанопластинок по сравнению с наночастицами технического углерода (Schinwald *et al.*, 2012).

Наконец, при определении риска имеет значение количество наночастиц, воздействию которых подвергается человек (Borm and Castranova, 2009; Oberdörster, 2010; Maynard *et al.*, 2011).

Существуют различия в индивидуальной реакции на вдыхаемые наночастицы. Например, существуют различия в реакции на вдыхание наночастиц аморфного кремнезема, что позволяет предположить, что опасность таких наночастиц может быть относительно большой для пожилых людей, детей и диабетиков и относительно низкой для здоровых людей среднего взрослого возраста (Chen *et al.*, 2008; Шуэпп и Слай, 2012).

Считается, что в опасности вдыхания стойких неорганических и углеродных наноматериалов участвуют различные молекулярные механизмы. К ним относятся высвобождение токсичных веществ и образование активных форм кислорода, таких как супероксиды и гидроксильные радикалы (Махтаб *et al.*, 2007; Обердөрстер, 2010; Эльзессер и Ховард, 2011; Лю *et al.*, 2011; Мейнард *et al.*, 2011; Паур *et al.*, 2011; Шукла *et al.*, 2012). Взаимодействия наномолекул с белком и ДНК отрицательно влияют на функциональность этих биомолекул, и в случае наноглины физическое повреждение биологических структур также может способствовать опасности наночастиц (Бхаттачарья и Мукерджи, 2008; Horie *et al.*, 2009; Миллинен, 2009; Ан и Джин, 2011; Гагнер *et al.*, 2011; Лордан, Кеннеди и Хиггинботам, 2011). Взаимодействие наночастиц с биомолекулами, что приводит к образованию agglomerates может влиять на биологические эффекты тоже (Хори и Фудзита, 2011). Считается, что эти молекулярные механизмы также имеют отношение к другим видам воздействия на человека (Рейндерс, 2012) и к экотоксичности (например, Иваск *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012).

Инструментом, который может быть полезен для обеспечения безопасности в отношении воздействия новых наноматериалов по воздуху, являются стандарты воздействия. В настоящее время они появляются на рабочих местах, хотя еще нет для воздействия вне рабочего места (Кунцли, 2011; ван Брукхейзен и Рейндерс, 2011). В некоторых случаях имеющиеся данные о токсичности были признаны достаточными для определения пределов воздействия на здоровье в качестве стандартов на рабочем месте (NIOSH, 2010, 2011). В США NIOSH предложила обоснованный для здоровья предел воздействия наночастиц TiO в воздухе рабочего места на основе имеющихся данных о токсичности; в частности, данных, связывающих опухоли с воздействием. Этот предлагаемый стандарт составляет 0,3 мг м⁻³ как средневзвешенное по времени значение до 10 часов в день при 40-часовой рабочей неделе. Этот стандарт в 8 раз строже, чем стандарт США для тонкодисперсных частиц TiO₂ (NIOSH, 2011). NIOSH также опубликовала проект standard для определения допустимого уровня воздействия углеродных нанотрубок и углеродных нановолокон на здоровье человека на основе имеющихся данных о токсичности. В этом случае опасность оправдывала бы 8-часовой взвешенный по времени средний предел воздействия в диапазоне от 0,2 до 2,0 мкгм⁻³ уровнем обнаружения, 7,0 мкгм⁻³ было предложено в качестве проекта ограничения воздействия (NIOSH, 2010).

Другой подход к установлению стандартов был предложен Паулуном (Pauluhn, 2011). Это общий подход, основанный на массе, основанный на предположении, что вытеснение частиц происходит

et al

объем, соответствующий предотвращению перегрузки наночастицами, как определено в исследованиях на крысах, должен быть основой для установления стандарта. Одной из проблем, связанных с предложением Паулуна, является неопределенность в отношении правильности экстраполяции перегрузки, установленной у крыс, на опасность для здоровья человека (Мейнард *et al.*, 2011).

Во многих случаях имеющихся данных о токсичности недостаточно для установления стандартов воздействия. Это привело к разработке стратегий, основанных на принципе предосторожности, который допускает вмешательство правительства в отсутствие убедительных научных доказательств. В результате были предложены стандарты предосторожности, предварительные эталонные значения наноразмерности и контрольные уровни (van Broekhuizen and Reijnders, 2011; van Broekhuizen *et al.*, 2012). Например, предварительные нано-эталонные значения воздействия (био) стойких наночастиц на рабочем месте были приняты представителями профсоюзов и организаций работодателей в Нидерландах (van Broekhuizen *et al.*, 2012). Для длинных жестких нановолокон и нанотрубок временное эталонное значение наноматериалов, взвешенное по времени за 8 часов, составляет 0,01 доли см^{-3} а для гранулированных наноматериалов это составляет 20 000 или 40 000 частиц см^{-3}

, зависящий

от плотности (ван Брукхейзен *et al.*, 2012). Эти предварительные нано-эталонные значения связаны с тремя ранее упомянутыми факторами, определяющими риск и /или опасность: количеством, формой и жесткостью. По словам представителей голландских профсоюзов и организаций работодателей, при превышении предварительных эталонных значений выбросов наночастиц следует определять источник (источники) выбросов наночастиц и принимать меры по их сокращению.

Третий подход к установлению стандартов был предложен Британским институтом стандартов (BSI) (2007). Этот подход основан на масштабировании по текущим санитарным нормам для крупных частиц. Например, для нерастворимых наноматериалов BSI предлагает базовое значение $0,066 \times$ текущего предела воздействия на рабочем месте для крупных частиц (макрочастиц). Для наночастиц, более крупные частицы которых классифицируются как канцерогенные, мутагенные, астмогенные или репродуктивные токсины, предлагаемый стандарт составляет $0,1 \times$ действующего на рабочем месте предела воздействия макрочастиц.

Еще один подход был предложен Хестербергом *et al.* (2010), воз провела обзор исследований, в ходе которых добровольцы-люди подвергались воздействию частиц выхлопных газов дизельных двигателей. Они сообщили об отсутствии побочных эффектов на уровне примерно от 30 000 до 50 000 частиц в сантиметре.³

и предположил, что это

может быть использовано в качестве эталонного значения для оценки потенциального вреда наночастиц для здоровья человека. Такой подход привел бы к стандартам, примерно аналогичным голландским предварительным эталонным значениям наноматериалов для гранулированных наноматериалов.

Попытки соответствовать таким стандартам на рабочем месте или, в более общем плане, снизить риск воздействия воздушно-капельным путем в настоящее время, как правило, сосредоточены на устранении, замене и инженерных средствах контроля как можно ближе к источникам опасных веществ (Ayotte, 2011; Reijnders, 2012). Варианты замены, устранения и технического контроля приведены в Таблице 13.1.

13.3 Опасности для здоровья человека и риски, связанные с употреблением в пищу Стойких неорганических наноматериалов

Изучение опасностей, связанных с употреблением наночастиц в пищу, до сих пор было очень ограниченным. В зависимости от размера и характера поверхности частицы возможно перемещение проникаемых неорганических наноматериалов из кишечника в сердечно-сосудистую систему (Флоренс, 2005; Пауэлл *et al.*, 2010; Кушен *et al.*, 2011). Относительно больше известно о

Варианты снижения риска для здоровья человека в условиях воздействия переносимых воздушно-капельным путем инор- Таблица

13.1 органические и углеродные наночастицы (Пелле et al, 2009; Воски, 2010; Айотт, 2011; Флери et al.,

2011; Деревенщина и Макфейл, 2011; Reijnders, 2012).

Пример (ы) варианта(вариантов) снижения риска

Устранение /замена

Замена менее опасными веществами Замена Cг и Ni на Fe в

производство углеродных нанотрубок; исключение
металлических катализаторов
при производстве углеродных нанотрубок

Подавление основных факторов, определяющих
опасность; снижение "внутренней"
опасности наночастиц

Подавление образования реакционноспособных
формы кислорода путем нанесения покрытия или
легирования; уменьшение присутствия
металлических загрязнений в углеродных нанотрубках;
повышение растворимости фуллеренов

Технические средства контроля для уменьшения

выделения наночастиц Увеличение выхода наночастиц в

соответствие спецификациям продукта,
для снижения рисков, связанных с обращением с отходами,

Хорошо изолированный на месте разработка

наночастицы на/в материале, используемом

для нанесения покрытия или

встраивания; использование маточных

партий с высокой концентрацией

наночастиц вместо порошков с хорошо

контролируемым переносом наночастиц

Может применяться ко многим наночастицам
производственных процессов

Производство самоочищающегося стекла;

производство полимеров и наночастиц
нанокompозиты

Разработка для уменьшения

высвобождения наночастиц Имобилизация наночастиц на

субстраты вместо свободных наночастиц Влажная

химия при производстве наночастиц

Использование перчаточных ящиков и вытяжек Использование
местной вентиляции и бесперебойного питания.

высокоэффективные воздушные фильтры

с твердыми частицами (HEPA)

Могут применяться для изготовления многих наноматериалов
производственные процессы

Каталитические нейтрализаторы в автомобилях

Применение TiO_2 для

разложение опасных веществ Образование

 Al_2O_3 наночастицы Лабораторная

работа с наночастицами Вблизи сосудов,

в которых смешиваются наночастицы

материалы и реакторы для осаждения из
паровой фазы во время очистки; фильтрация
выхлопных газов, содержащих наночастицы

эффекты приема внутрь наночастиц Ag (коллоидного серебра), которые уже давно используются в качестве лекарства (Паньяла, Пена-Мендес и Гавел, 2008; Чжан et al., 2011b) и может наноситься в аэрозольных баллончиках (Квадрос и Марр, 2011). Попадание наночастиц Ag в организм может привести к отложению Ag в органах, причем предпочтительный орган для отложения зависит от размера частиц и характеристик поверхности (Ланквельд et al, 2010; Лешнер et al., 2011). Большие дозы коллоидного серебра, попадающего внутрь, связаны с дисфункцией центральной нервной системы, печени, и почек, а также с тяжелыми иммунологическими реакциями (Паньяла et al, 2008; Чжан et al., 2011b). Сильное воздействие наночастиц Ag также может привести к отложению серебра в слизистых оболочках и под кожей (аргирия) (Panyala et al, 2008; Чжан et al., 2011b).

Имеются некоторые доказательства воспаления кишечника и иммуномодуляции при приеме внутрь наноматериалов титана (Рейндерс, 2008). При приеме мышами внутрь большое количество аморфного нанокремнезема было связано с негативным воздействием на функцию печени (So, Jang, and Han, 2008).

13.4 Экоотоксичность стойких неорганических и углеродных наноматериалов

Исследования, касающиеся экоотоксичности стойких неорганических и углеродных наночастиц, крайне фрагментарны по сравнению с тем, что позволило бы уверенно оценить опасность и риск (Pelley *et al.*, 2009; Менар *et al.*, 2011; Турко *et al.*, 2011; Петерсен *et al.*, 2011). В то время как измерения фактического воздействия атмосферных снэппед наночастицы были опубликованы (см. МФ. Kuhlbusch *et al.*, 2011; ван Брукхейзен *et al.*, 2012), практически нет эмпирических данных, непосредственно относящихся к присутствию и судьбе искусственно созданных наночастиц в водных и почвенных экосистемах, в которые могут попасть переносимые по воздуху наночастицы (Farré, Sanchis, and Barcelo, 2011). Аналогичным образом, очень мало известно о поведении инженерных наноматериалов в окружающей среде, продуктах их превращения или комплексах, которые они могут образовывать (Христозов *et al.*, 2012; Новак *et al.*, 2012).

Была проведена некоторая работа по моделированию будущего присутствия стойких неорганических и углеродных наночастиц в окружающей среде, но результаты весьма неопределенны, поскольку исследования фактической судьбы высвобождаемых наночастиц, которые могли бы быть использованы для проверки сделанных предположений, очень ограничены (например, Turco *et al.*, 2011; Jensen-Eckelman *et al.*, 2012; Раманан *et al.*, 2012). Разнообразие ассоциаций, которые могут образовываться в водных и почвенных экосистемах, кроме того, предположительно намного больше, чем разнообразие агломератов, содержащих искусственно созданные наночастицы в воздухе (Дарлингтон *et al.*, 2009; Ottofuelling, von der Kammer, and Hofman, 2011; van Hoeske *et al.*, 2011) и вероятность того, что поверхности наномассивных частиц будут отличаться от исходных поверхностей (например, из-за старения и деградации их покрытий; Ауффан *et al.*, 2010; Мудункотува *et al.*, 2012) будет значительно увеличен по сравнению с обычным воздействием на человека на рабочем месте (например, Перейра *et al.*, 2011). Более того, эмпирические исследования экоотоксичности, проводимые на практике, как правило, предоставляют меньше информации о физико-химических характеристиках тестируемых наночастиц, чем исследования, касающиеся воздействия на человека воздушно-капельным путем (Menard *et al.*, 2011).

Большая часть экотоксикологических исследований была проведена в отношении TiO_2 , Ag и некоторые типы углеродных наночастиц (нанотрубки и фуллерены). Доступные исследования, касающиеся TiO_2 с помощью наночастиц изучалось воздействие микроорганизмов, водорослей, высших растений, пресноводных рыб, водных беспозвоночных и наземных беспозвоночных (Du *et al.*, 2011; Менар *et al.*, 2011). Исследования моделирования последствий широкого применения наночастиц TiO позволяют предположить, что концентрации в очищенных сточных водах могут проявлять экоотоксичность (Мюллер и Новак, 2008; Готтшалк *et al.*, 2010). Однако, как отмечалось ранее, результаты модельных исследований весьма неопределенны. Доступные исследования экоотоксичности предполагают, что размер частиц и площадь поверхности частиц могут быть определяющими факторами экоотоксичности (Menard *et al.*, 2011).

Исследования, касающиеся экоотоксичности наночастиц Ag, выявили высвобождение ионов Ag и образование из последних наночастичных соединений Ag (Liu and Hurt, 2010). Сообщалось также об относительно высокой подвижности и стабильности наночастиц Ag с колпачками и карбонатным покрытием в поверхностных водах (Thio *et al.*, 2011; Piccapietra *et al.*, 2012). Было отмечено, что широкое применение наночастиц Ag может негативно повлиять на

функционирование очистных сооружений сточных вод, основанных на микробиологической конверсии (Луна- Delriisco *et al.*, 2011; Шэн и Лю, 2011). Это, в свою очередь, может, *ceteris paribus*, приводить к повышенному загрязнению воды органическими соединениями. Будет ли на самом деле негативное воздействие на очистные сооружения для сточных вод от использования наночастиц Ag, остается весьма неопределенным, не в последнюю очередь потому, что чувствительность различных бактерий, участвующих в очистке сточных вод, сильно различается, а также потому, что бактерии в биопленках, как правило, менее уязвимы к Ag, чем бактерии в чистых культурах (Sheng and Liu, 2011). Модельное исследование, касающееся будущих применений наночастиц Ag, предполагает, что очищенные сточные воды могут проявлять экотоксичность по отношению к наночастицам Ag, негативно воздействуя на прокариот, рыб и беспозвоночных (Готтшалк *et al.*, 2010; Фабера *et al.*, 2011), но опять же соответствие этого результата реальному миру крайне неопределенно.

Имеющиеся исследования, касающиеся углеродных наноматериалов, пока, по-видимому, не позволяют делать выводы об их фактическом или ожидаемом воздействии на экосистемы (Петерсен). *et al.*, 2011; Петерсен и Генри, 2011; Турко *et al.*, 2011).

13.5 Заключение

Стойкие неорганические и углеродные наночастицы все чаще разрабатываются для практического применения, но они могут быть опасны для человека. Относительно много известно о опасностях для здоровья человека, связанных с вдыхаемыми наночастицами, которые могут вызывать респираторные заболевания и оказывать негативное воздействие на другие органы, включая сердечно-сосудистую систему. Факторами, определяющими риск и /или опасность вдыхания наночастиц, являются размер, характеристики поверхности, форма, жесткость, структура и образование ассоциаций. Основным молекулярным механизмом, лежащим в основе опасности вдыхания наночастиц, является образование активных форм кислорода, но этому могут способствовать и другие механизмы, такие как высвобождение токсичных веществ и взаимодействие с белками и ДНК. Опасность для здоровья человека может быть связана с попаданием в организм стойких неорганических и углеродных наночастиц после их выведения из легких. Опасности и риски для экосистем в высшей степени неопределенны. Варианты снижения опасности для человека, связанной с вдыханием разработанных наноматериалов, включают устранение и замену опасных наночастиц и использование технических средств контроля.

Список литературы.

- Эйлон, К.Л., Се, Ю., Эль-Генди, Н. *et al.* (2009) Влияние физико-химических свойств наноматериалов на токсичность in vitro. *Расширенные обзоры доставки лекарств.*, **61**, 457 - 466.
- Ап, Н. и Jin, В. (2011) Воздействие бакминстерфуллера (C60) на ДНК: к ДНК стабильность, реакционная способность и репликация. *Наука и технология в области охраны окружающей среды*, **45**, 6608- 6616.
- Aschberger, K., Micheletti, C., Sokull-Klüttgen, B. and Christensen, F.M. (2011) Analysis из имеющихся в настоящее время данных для характеристики риска, связанного с искусственными наночастицами для окружающей среды и здоровья человека - уроки, извлеченные из четырех тематических исследований. *Environment International*, **37** 1143 - 1156.
- Ауффан, М., Педеутор, М., Роуз, Дж. *et al.* (2010) Структурная деградация на поверхности TiO₂ -наноматериал на основе, используемый в косметике. *Наука и технологии в области охраны окружающей среды.*, **44**, 2689 -2694.

- Айотт, П. Р. (2011) Актуальны ли классические концепции безопасности технологических процессов для приложений в области нанотехнологий-катионы? *Серия конференций Journal of Physics*, **304**, 012071.
- Эйрес, Дж. Дж., Борм, П., Кэсси, Ф. Р. *et al.* (2008) Оценка токсичности частиц, переносимых по воздуху-неорганические вещества и наночастицы путем измерения потенциала окислительного стресса. *Вдыхание Токсикология*, **20**, 75-99.
- Бимиш, Л. А., Осорнио-Варгас, А. Р. и Вайн, Э. (2011) Загрязнение воздуха: экологический фактор, способствующий кишечным заболеваниям. *Журнал болезни Крона и колита*, **5**, 279-286.
- Бенивал Р. и Шивготра В. К. (2009) Элементарная основа для оценки автомобиля-диоваскулярная токсичность углеродной сажи: опыт профессионального обследования состояния здоровья работников алмазной промышленности. *Средства и методы в токсикологии*, **9**, 194-200.
- П. (2008) Наночастицы серебра, выделяющиеся в воду из коммерческих источников.- доступные ткани для носков. *Наука и технология об окружающей среде*, **42**, 4133-4139.
- Бхатт И. и Трипати Б. Н. (2011) Взаимодействие сконструированных наночастиц с различными компоненты окружающей среды и возможные стратегии оценки их риска. *Химия-сфера*, **82**, 308-317.
- Бхаттачарья Р. и Мукерджи П. (2008) Биологические свойства "голых" металлических наночастиц-тиклы. *Расширенные обзоры доставки лекарств*, **60**, 1289- 1306.
- Борм П. и Кастратова В. (2009) Токсикология наноматериалов: постоянный интерактивный *Токсикология частиц и волокон обучение*, **6**, 28.
- Брайдиш-Столле, Л. К., Лукас, Б., Шранд, А. (2010) Наночастицы серебра разрушают *et al* Передача сигналов GDNF/Фун-киназы в сперматогонияльных *Токсикологические науки*, **116**, 577-589.
- Британский институт стандартов (2007), PD 6699-2-2007. *Нанотехнологии - Часть 2: Руководство по Безопасному обращению и утилизации произведенных наноматериалов*, BSI, Лондон.
- ван Брукхейзен П. и Рейндерс Л. (2011) Строительные блоки для осторожного подхода к использованию наноматериалов. *Анализ рисков*, **31**, 1646- 1657.
- ван Брукхейзен П., ван Брукхейзен Ф., Корнелиссен Р. и Рейндерс Л. (2012) Работают-место воздействия наночастиц и применение предварительных значений нанореференции во времена неопределенных рисков. *Журнал исследований наночастиц*, **14**, 1-25.
- Шефер-Перикас, К., Макьера, А. и Пучадес, Р. (2011) Функционализированная неорганика наночастицы, используемые в качестве меток в твердофазных иммуноанализах. *Тенденции в аналитической химии*. doi: 10.1016/j.trac.2011.07.011.
- Чен З., Мэн Х., Син Г. *et al.* (2008) Возрастные различия в легочных и сердечно-сосудистых реакциях на SiO₂ вдыхание наночастиц: к нанотоксичности подвержено население. *Наука и технология в области охраны окружающей среды*, **42**, 2442-2450.
- С. Л., Маккаспи, Р. И. и Хэкли, В. А. (2011) Персистенция отдельных заболеваний.- сохраненные наночастицы серебра в природных пресных водах, синтетической морской воде и искусственных эстуарийных водах. *Наука об окружающей среде в целом*, Чой, **409**, 2442 - 2450.
- Х. С., Лю, У., Лю, Ф. *et al.* (2010) Условия проектирования наночастиц, нацеленных на опухоль. *Природные нанотехнологии*, **5**, 42-47.
- Клифт, доктор медицинских наук, Ротен-Рутихаузер, Б., Браун, доктор медицинских наук. *et al.* (2008) Влияние различных химический состав поверхности наночастиц, влияющий на поглощение и токсичность клеточной линии макрофагов мыши. *Токсикология и прикладная фармакология*, **232**, 418-427.
- Кушен М., Керри Дж., Моррис М. *et al.* (2011) Нанотехнологии в пищевой промышленности- последние разработки, риски и регулирование. *Тенденции в области науки и технологий в области пищевых продуктов*. doi: 10.1016/j.tifs.2011.10.006

- Дарлингтон, Т.К., Нейг, А.М., Спенсер, М.Т. *et al.* (2009) Характеристики наночастиц влияющие на экологическую судьбу и перенос через почву. *Экологическая токсикология и химия*, **28**, 1191-1199. Даш Дж. и Д'Арсидж. (2008) Физико-химическая характеристика частиц, находящихся в воздухе, - вещества, образующиеся при сварочных работах на автомобильных заводах. *Журнал охраны труда и гигиены*, **5**, 444 - 454. Ду, У., Сун, Ю., Джи, Р. *et al.* (2011) TiO₂ и наночастицы ZnO отрицательно влияют на пшеницу рост и активность почвенных ферментов в сельскохозяйственных почвах. *Журнал мониторинга окружающей среды*, **12**, 822-828. Даффин Р., Тран Л., Браун Д. *et al.* (2007) Провоспалительные эффекты низкой токсичности и наночастицы металлов in vivo и in vitro: подчеркивание роли площади поверхности частиц и реакционной способности поверхности. *Токсикология при вдыхании*, **19**, 849-856. Эльзесер А. и Ховард С.В. (2011) Токсикология наночастиц. *Передовые технологии производства лекарств-обзоры*. doi: 10.1016/j.дополнение.2011.09.001.
- Фабрега Дж., Луома С.Н., Тайлер К.Р. *et al.* (2011) Наночастицы серебра: поведение и эффекты в водной среде. *Международная организация по окружающей среде*, **37**, 517 - 531.
- Фарре М., Санчис Дж. и Барсело Д. (2011) Анализ и оценка возникновения, судьбы и поведения наноматериалов в окружающей среде. *Тенденции в аналитической химии- история*, **30**, 517-527. Феррейра О.П., Фильо А.Г.С. и Алвес О.Л. (2010) Переработка интеркалированного додециламина ванадатные нанотрубки. *Журнал исследований наночастиц*, **12**, 367 - 372.
- Флери, Д., Бомфим, Дж.А.С., Винь, А. *et al.* (2011) Определение основных факторов воздействия - факторы риска при производстве нанокмпозитов УНТ-полимер методом формования из расплава. *Журнал "Чистое производство"*. doi: 10.1016 / j.jclepro.2011.11.009. Флоренс, А.Т. (2005) Поглощение наночастиц оральным путем: реализация его потенциала? *Лекарство* *Открытие сегодня: технологии*, **2**, 75-81.
- Фубини Б., Гиaccia М. и Фенолио И. (2010) Физико-химические особенности инженерных наночастицы, соответствующие их токсичности. *Нанотоксикология*, **4**, 347 - 363.
- Ганнер, Дж.Э., Лопес, доктор медицинских наук, Дордик, Дж.С. и Сигел, Р. В. (2011) Эффект нанопаристого золота- морфология клеток, влияющая на структуру и функцию адсорбированного белка. 7241 - 7252. *Биоматериалы*, **32**.
- Гловей Р.Д., Миллер Дж.М. и Хатчисон Дж.Э. (2011) Получение металлических наночастиц из предметов из серебра и меди: динамика наночастиц на поверхностях и потенциальные источники наночастиц в окружающей среде. *ACSNANO*, **11**, 8950 - 8957. Гомес-Меджиба, С. Э., Чжай, З., Акрам, Х. *et al.* (2009) Вдыхание загрязняющих окружающую среду веществ стрессоры и хроническое воспаление: аутоиммунитет и нейродеградация. *Исследование мутаций*, **674**, 62-72.
- Готтшалк Ф., Зондерер Т., Шольц Р. В. и Новак Б. (2010) Возможности и пределы- методы моделирования воздействия инженерных наноматериалов на окружающую среду с помощью вероятностного анализа потоков материалов. *Экологическая токсикология и химия*, **29**, 1036 - 1048.
- Гамильтон Р.Ф., Ву Н., Портер Д. *et al.* (2009) Диоксид титана, зависящий от длины частиц токсичность и биологическая активность наноматериалов. *Токсикология частиц и волокон*, **6**, 35.
- Хестерберг, Т.В., Лонг, К.М.Н., Лапин, К.А. *et al.* (2010) Частицы выхлопных газов дизельного топлива (DEP) и воздействие наночастиц: что клинические исследования DEP на людях говорят нам о потенциальной опасности наночастиц для здоровья человека. *Токсикология при вдыхании*, **23**, 679 - 694.

- van Hoeske, K., de Schampelaere, K.A.C., van der Meeren, P. *et al.* (2011) Агрегация- и экотоксичность генерального директора₂ наночастицы в синтетических и природных водах с различным значением pH, концентрацией органических веществ и ионной силой. *Загрязнение окружающей среды.*, **159**, 970-976. Хори
- М. и Фуджита К. (2011) Токсичность наночастиц оксида металла. *Достижения в области молекулярной-*, **4**, 145- 178. *общая токсикология*
- Хори, М., Нисиро, К., Фуджита, К. *et al.* (2009) Адсорбция белка ультрадисперсным оксидом металла и его влияние на цитотоксичность по отношению к культивируемым клеткам. *Химические исследования в токсикологии*, **22**, 543 -553.
- Хоугаард, К.С., Джексон, П., Дженсен, К.А. *et al.* (2010) Последствия пренатального воздействия наноразмерного диоксида титана с покрытием поверхности (УФ-Титан). Исследование на мышах. *Токсикология частиц и волокон*, **7**, 16.
- Христозов Д.Р., Готтардо С., Критто А. и Маркомини А. (2012) Оценка риска инженерные наноматериалы: обзор имеющихся данных и подходов с точки зрения регулирования. *Нанотоксикология*. doi: 10.3109/17435390.2011. 626534
- Хаббс А.Ф., Мерсер Р.Р., Бенкович С.А. *et al.* (2011) Нанотоксикология - взгляд патолога. *Токсикологическая патология*, **39**, 301 - 324.
- Хусейн С., Боланд С., Баеза-Сквибан А. *et al.* (2009) Окислительный стресс и провоспаление- основные эффекты наночастиц технического углерода и диоксида титана: роль площади поверхности и усвоенного количества. *Токсикология*, **260**, 142-149. Иваск А., Суарес Э., Патель Т. *et al.* (2012) Общегеномный скрининг бактериальной токсичности раскрывает механизмы токсичности катионных полистирольных наноматериалов. *Экологическая наука и технологии*. doi: 10.1021/es203087m.
- Джексон П., Хоугаард К.С., Фогель У. *et al.* (2011) Воздействие углерода на беременных мышей черным путем интрахеальной установки: токсикогеномные эффекты у самок и потомства. *Исследование мутаций*. doi: 10.1016/j.mrgentox.2011.09.018
- Дженсен-Экельман, М., Маутер, М.С., Айзекс, Дж. и Элимелех, М. (2012) Новые перспективы об экотоксичности наноматериалов в водной среде: воздействие производства превышает воздействие прямого воздействия для углеродных нанотрубок. *Наука и технология в области охраны окружающей среды*. doi: 10.1021/es203409a
- Чонг Г. (2009) Функционализация поверхности одностенных углеродных нанотрубок с использованием металлических наночастиц. *Общество по операциям с цветными металлами Китая*, **19**, 1009 - 1012.
- Цзя Г., Ван Х., Янь Л. *et al.* (2005) Цитотоксичность углеродных наноматериалов: одностенных нанотрубок, многостенных нанотрубок и фуллеренов. *Наука и технология в области охраны окружающей среды.*, **39**, 1378-1383.
- Каят Дж., Гаджбхне В., Текаде Р.К. и Кумар Н. (2011) Легочная токсичность углерода нанотрубки: систематический отчет. *Наномедицина, нанотехнологии, биология и медицина*, **7**, 40-49. Ким Дж.С., Сон К.С., Ли Дж.К. *et al.* (2011) Токсикогеномное сравнение многостенных автомобилей нанотрубки боп (MWCNTs) и асбест. *Архивы токсикологии*. doi: 10.1007/s00204-011-0770-6 Клейн, С.Дж., Кельманс, А.А., Хорн, Н. *et al.* (2012) Парадигмы оценки воздействия на окружающую среду воздействие производимых наноматериалов. *Экологическая токсикология и химия*, **31**, 3-14. Койке Э. и Кобаяши Т. (2011) Химические и биологические окислительные эффекты углерода наночастицы сажи. *Хемосфера*, **65**, 946 - 951.

- Kreyling, W.G., Semmler-Behnke, M., Erbe, F. *et al* (2002) Транслокация ультрадисперсных количество нерастворимых частиц иридия из эпителия легких во внелегочные органы зависит от размера, но очень невелико. *Журнал токсикологии и гигиены окружающей среды, часть А*, **65**, 1513- 1520. Kreyling, W.G., Sammler-Behnke, M., Seitz, J. *et al*. (2009) Зависимость перемещения вдыхаемых агрегатов наночастиц иридия и углерода от размера- из легких крыс в кровь и вторичные органы-мишени. *Ингаляционная Токсикология*, **21**, 55 - 60. Kuhlbusch, T.A.J., Asbach, C., Fissan, H. *et al*. (2011) Воздействие наночастиц на нанотехнологических предприятиях- рабочие места в области нанотехнологий: обзор. *Токсикология частиц и волокон*, **8**, 22.
- Кунцли, Н. (2011) От стенда к политике: готовы к стандарту качества воздуха с наночастицами? *Европейский кардиологический журнал*, **32**, 2613 - 2615.
- Ланкофф А., Сандберг В.Дж., Вегерек-Чук А. *et al*. (2012) Эффект агломерации *et al* влияние наночастиц серебра и диоксида титана на клеточный ответ клеток HepG2. *Journal of Cellular Biochemistry*, **106**, 4549-4559. Ланкофф А., Оомен, А.Г., Кристек, П. *et al*. (2010) Кинетика распределения в тканях о наночастицах серебра разного размера. *Биоматериалы*, **31**, 8350- 8361.
- Лимбах Л., Вик П., Мансер О.П. *et al*. (2007) Воздействие сконструированных наночастиц на эпителиальные клетки легких человека: влияние химического состава и каталитической активности на окислительный стресс. *Journal of Applied Toxicology*, **29**, 4158-4163.
- Кинетика высвобождения ионов и стойкость частиц в водных наноматериалах- коллоиды серебра. *Наука и технология в области охраны окружающей среды*, **4**, 2169-2175.
- Лю, Х., Сен, С., Лю, Дж. *et al* (2011) Дезактивация антиоксидантов на графеном наноматериале поверхности. *Маленький*, **7**, 2775 - 2785.
- Лешнер К., Хадруп Н., Квортруп К. *et al*. (2011) Распределение серебра у крыс после 28 дней повторного перорального воздействия наночастиц серебра или ацетата серебра. *Токсикология частиц и волокон*, **8**, 18.
- Лонгмайр, М.Р., Огава, М., Чойке, П.Л. и Кобаяши, Х. (2011) Биологически оптимизированные молекулы и частицы наноразмерного размера; больше, чем просто размер. *Химия биоконъюгатов*, **22**, 993- 1000.
- Лордан С., Кеннеди Дж.Э. и Хиггинботам К.Л. (2011) Цитотоксические эффекты, вызванные немодифицированные и органически модифицированные наноглины в линии клеток печени человека HepG2. *Журнал прикладной токсикологии*, **31**, 27-35. Луна-Дельриско, М., Оруполд, К. и Дюбургье, Х. (2011) Влияние CuO на размер частиц и ZnO о производстве биогаза и метана при анаэробном сбраживании. *Журнал опасных материалов*, **189**, 603 - 608.
- П., Сиддики Н.А., Маром Г. и Ким Дж. (2010) Дисперсия и функционализация углеродных нанотрубок для нанокмпозитов на основе полимеров: обзор. *Композиты: часть А*, **41**, 1345-1367. Махтаб Р., Сили С.М., Хуньяди С. Е. *et al*. (2007) Влияние природы катионов поверхности квантовых точек на взаимодействия с ДНК. *Журнал неорганической биохимии*, **101**, 559-564. Марамбио-Джонс, К. и Хук, Э.М.В. (2010) Обзор антибактериальных эффектов серебра. наноматериалы и потенциальные последствия для здоровья человека и окружающей среды. *Журнал исследований наночастиц*, **12**, 1531 - 1551.
- Мейнард, А.Д., Вархейт, Д.Б. и Филберт, М.А. (2011) Новая токсикология сложных материалов- катионированные материалы: нанотоксикология и не только. *Токсикологические науки*, **120**, S109-S129.

- Менар, А., Дробне, Д. и Джебек, А. (2011) Экоотоксичность наноразмерного TiO_2 обзор сведения Виво. *Загрязнение Окружающей Среды*, **159**, 577-584.
- Монтейлер, К., Тран, Л., Макни, У. *et al.* (2007) Провоспалительные эффекты низкотоксичных низкорастворимых частиц, наночастиц и мелкодисперсных частиц, на эпителиальные токсичность частиц с низкой растворимостью на эпителиальных клетках in vitro. *Медицина труда и окружающей среды*, **64**, 609-615. Мудункотува И., Петтибуон Дж.М. и Грассиан В.Х. (2012) Последствия для окружающей среды старения наночастиц при обработке и дальнейшей судьбе наноматериалов на основе меди. *Экологическая наука и технология*. doi: 101021 / es203851d.
- Мюллер, Н.К. и Новак, Б. (2008) Моделирование воздействия искусственных наночастиц в окружающей среде. *Наука и технологии в области охраны окружающей среды*, **42**, 4447-4453.
- Миллинен Ф. (2009) Повреждение ДНК на расстоянии. *Нанотехнологии природы*, **4**, 795-796.
- Напьерска, Д., Томассен, Л.К.Дж., Лизон, Д. *et al.* (2010) Опасность нанокремнезема: еще один переменный объект. *Токсикология частиц и волокон*, **7**, 39.
- NIOSH (2010) Воздействие углеродных нанотрубок и нановолокон на рабочем месте. *Текущая информация-информационный бюллетень*, **161-A**, 1-149.
- NIOSH (2011) Воздействие диоксида титана на производстве. *Текущий информационный бюллетень*, **63**, 1-119.
- Новак, Б., Ранвилл, Дж.Ф., Даймонд, С. *et al.* (2012) Потенциальные сценарии использования наноматериалов *et al* выброс и последующее изменение в окружающей среде. *Экологическая токсикология и химия*, **31**, 50-59. Обердорстер Г.
- (2010) Оценка безопасности нанотехнологий и наномедицины: концепции нанотоксикологии. *Журнал внутренней медицины*, **267**, 89-105.
- Оттофузлинг С., фон дер Каммер Ф. и Хофман Т. (2011) Коммерческий диоксид титана наночастицы как природных, синтетических воды: комплексный многоаспектный тест-ING и прогнозирование агрегационной способности. *Экологическая Наука и технологии*, **45**, 10045- 10052.
- Паняла, Н.Р., Пена-Мендес, Э.М. и Гавел, Дж. (2008) Серебро или наночастицы серебра: опасная угроза окружающей среде и здоровью человека? *Журнал прикладной биомедицины*, **6**, 117- 129.
- Парк, М.В.Д.З., Нейг, А.М., Вермюлен, Дж.П. *et al.* (2011) Влияние размера частиц на цитотоксичность, воспаление, токсичность для развития и генотоксичность наночастиц серебра. *Биоматериалы*, **32**, 9810 - 9817. Паулун, Дж.
- (2011) Плохо растворимые твердые частицы: поиск объединяющего знаменателя наночастицы и мелкие частицы для оценки DNEL. *Токсикология*, **279**, 176- 188.
- Паур, Х., Кэсси, Ф.Г., Тигуарден, Дж. *et al.* (2011) Исследования воздействия на клетки In vitro для оценка токсичности наночастиц в легких - диалог между аэрозольной наукой и биологией. *Национальный журнал Аэроэкологии*, **42**, 668 -692.
- М.А. (2009) Состояние академических знаний о токсичности и биологическая судьба квантовых точек. *Токсикологические науки*, **112**, 276 - 296.
- Перейра, Р., Роша-Сантос, Дж.А.П., Антунес, Ф.Э. *et al.* (2011) Скрининговая оценка экологической токсичности и генотоксичности почв, загрязненных органическими и неорганическими наночастицами : роль старения. *Журнал опасных материалов*, **194**, 345 -354.
- Питерс Т.М., Элзи С., Джонсон Р. *et al.* (2009) Мониторинг в воздухе для различения разработанные наноматериалы из случайных частиц для охраны здоровья и безопасности окружающей среды. *Журнал гигиены труда и окружающей среды*, **6**, 73 -81.

- Петерсен, Э.Дж. и Генри, Т.Б. (2011) Методологические соображения по тестированию экологичности-токсичность углеродных нанотрубок и фуллеренов. *Экологическая токсикология и химия*. doi: 10.1002/etc.710. Петерсен Э.Дж., Чжан Л., Мэттисон Н.Т. *et al.* (2011) Потенциальные пути высвобождения, воздействие на окружающую среду-судьба углеродных нанотрубок и экологические риски. *Наука об окружающей среде и технология*, **45**, 9837 - 9856. Пиккапитра Ф., Сигт Л. и Бехра Р. (2012) Коллоидная стабильность серебра с карбонатным покрытием наночастицы в синтетической и природной пресной воде. *Наука и технология об окружающей среде огу*, **46**, 818 - 825. Пауэлл, Дж.Дж., Фария, Н., Томас-Маккей, Э. и Пеле, Л. С. (2010) Происхождение и судьба пищевых продуктов наночастицы и микрочастицы в желудочно-кишечном тракте. *Журнал аутоиммунологии- огу*, **34**, J226 - J233. Квадрос, М. Э. и н. Я. Марра, л. с. (2011) наночастиц серебра и общая аэрозоли выбрасываются связанные нанотехнологии потребительский спреи. *Наука и технология об окружающей среде огу*, **45**, 10713 - 10719. Раболли В., Томассен Л.К.Дж., Увамбайинема Ф. *et al.* (2011) На цитотоксическую активность наночастиц аморфного кремнезема в основном влияет площадь поверхности, а не агрегация. *Письма по токсикологии*, **206**, 197 - 203.
- Рамачандран, Г., Остаат, М., Эванс, Д.Э.Н. *et al.* (2011) Стратегия оценки работы-подвергаться воздействию наноматериалов. *Журнал гигиены труда и окружающей среды Гигиена*, **8**, 673 - 685. Раманан Б., Холмс У.М., Слоан У.Т. и Феникс В.Р. (2012) Расследование перенос наночастиц внутри крупнозернистой геологической среды с использованием магнитно-резонансной томографии. *Наука и технология в области охраны окружающей среды*, **46**, 360 - 366.
- Рейндерс, Л. (2008) Снижение опасности в нанотехнологиях. *Журнал промышленной экологии*, **12**, 297- 306.
- Рейндерс, Л. (2012) Опасность для здоровья человека от стойких неорганических и углеродных наночастиц-cles. *Журнал материаловедения*, **47**, 5061-5073.
- Родс, Дж., Смит, К. и Стек, А.А. (2011) Характеристика частиц сажи при пожаре. замедленные и нанокompозитные материалы и их токсикологическое воздействие. *Разложение и стабильность полимеров*, **96**, 277-284. Рим К., Джим С., Хан Дж. *et al.* (2011) Влияние технического углерода на воспаление и окислительный процесс Повреждения ДНК в макрофагах мыши. *Молекулярная и клеточная токсикология*, **7**, 415-423.
- Ривет, К.Дж., Юань, Ю., Борка-Ташук, Д. и Гилберт, Р.Дж. (2012) Изменение свойств поверхности оксида железа наночастиц индуцирует цитотоксичность нейронов коры головного мозга. *Химические исследования в токсикологии*. идентификатор doi: 10.1021/tx200369s
- Сайеса С. М., Рид, К. Л. и Warheit, Д. Б. (2007) Оценка токсичности порядке и папорог-частиц жидкости: сравнение результатов измерений in vitro с профилями легочной токсичности in vivo. *Токсикологические науки*, **97**, 163-180.
- Шинвальд А., Мерфи Ф.А., Джонс А. *et al.* (2012) Нанопластины на основе графена: новый опасность для дыхательной системы вследствие их необычных аэродинамических свойств. *ACS NANO*. doi: 10.1021 / nn204229f
- Шуепп К. и Слай П.Д. (2012) Развивающиеся дыхательные пути и их специфические потребности в отношении воздействия ультрадисперсных твердых частиц. *Обзоры педиатрической респираторной системы*. doi: 10.1016/j.prrv.2011.08.002.

- Сцимчак В., Мензела Н. и Кечка Л. (2007) Эмиссия ультрадисперсных частиц меди универсальные двигатели, управляемые с помощью модуляции фазового угла. *Научный журнал по аэрозолям.*, **38**, 520-531.
- Земмлер-Бенке М., Крейлинг В.Г., Липка Дж. *et al.* (2008) Биологическое распределение 1,4 и 18-наночастицы золота у крыс. *Маленькие*, **4**, 2108-2111.
- Шэн З. и Лю Ю. (2011) Влияние наночастиц серебра на биопленки сточных вод. *Вода Исследования*, **45**, 6039-6050.
- Шукла, Р.К., Кумар, А., Гурбани, Д. *et al.* (2012) TiO₂ наночастицы вызывают окислительное повреждение ДНК и апоптоз в клетках печени человека. *Нанотоксикология*. doi: 10.3109/17435390.2011.629747.
- Сильвер, С. (2003) Бактериальная устойчивость к серебру: молекулярная биология и неправильное использование соединений серебра-фунты. *Микробиологические исследования FEMS*, **27**, 341 -353.
- Сильвер С., Пхунг Л.Т. и Сильвер Г. (2006) Серебро в качестве биоцидов в повязках для ожогов и ран и устойчивость бактерий к соединениям серебра. *Журнал промышленной микробиологии и биотехнологии*, **33**, 627 - 634. Так, С. Х. Чан, С. И., Хан, С. С. (2008) эффект микро/нано-частицы кремнезема, питающихся мышей. *Журнал нанонауки и нанотехнологий*, **8**, 5367 -5371. Соенен, С.Дж., Ривера-Гил, П., Монтенегро, Дж. *et al* . (2011) Клеточная токсичность неорганических частиц наночастицы: общие аспекты и рекомендации по улучшению оценки нанотоксичности. *Нанотехнологии сегодня*, **6**, 446 - 465. Сун Ю., Ли Х., Ван Л. *et al.* (2011) Наноматериалы в организме человека: идентификация, характеристики-характеристики и потенциальный ущерб. *Токсикологическая патология*, **39**, 841-849.
- Суд, А., Салих, С., Рох, Д. *et al* (2011) Передача сигналов о повреждении ДНК и цитокинов через клеточные барьеры, подверженные воздействию наночастиц, зависят от толщины барьера. *Nature Nanotech- нология*, **6**, 824-833.
- Стебунова Л.В., Морган Х., Грассиан В.Х. и Бреннер С. (2011) Здоровье и последствия профессионального воздействия инженерных наноматериалов для безопасности. *Провода Наномедицина и нанобиотехнология*. doi: 10.1002/wnan.174.
- Штурм Р. (2007) Компьютерная модель удаления нерастворимых частиц из трахеобронхиальное дерево *Компьютеры в биологии и медицине*, **37**, легкого человека. 680- 690.
- Штурм Р. и Хофманн У. (2009) Теоретический подход к нанесению и очистке-наличие волокон переменного размера в дыхательных путях человека. *Журнал опасных материалов.*, **170**, 210 -218. Табучи, А. и Кюблер, В.М. (2008) Эндотелий-тромбоцитарные взаимодействия при воспалительных заболеваниях легких. *Сосудистая фармакология*, **49**, 141 - 150.
- Тюо, Б.Дж.Р., Монтес, М., Эль Мохсен, М.А. *et al* . (2011) Подвижность покрытых нанопластин серебра-работает в экологически значимых условиях. *Наука и технология в области охраны окружающей среды. ogy*. doi: 10.1012/es203596w. Турко, Р.Ф., Бишофф, М., Тонг, З.Х. и Нис, Л. (2011) Экологические последствия наноматериалы: правильно ли мы изучаем? *Современное мнение в области биотехнологии*, **22**, 527- 532.
- Wohlleben, W., Brill, S., Meier, M.W. *et al.* (2011) О жизненном цикле нанокompозитов: сравнение высвобождаемых фрагментов и их опасностей in vivo из-за трех механизмов высвобождения и четырех нанокompозитов. *Небольшие*, **7**, 2384 - 2395.

- Вон, Х.И., Нерсисян, Х.Х. и Вон, К.В. (2010) Синтез при горении наноразмерных порошков карбида вольфрама и эффекты галогенидов натрия. *Журнал исследований наночастиц*, **12**, 493-500. Воски, С. (2010) Практика на рабочем месте для производителей инженерных наноматериалов. *Наномедицина и нанобиотехнология*, **2**, 685 - 692.
- Уинн, Дж.Х., Бакли, Дж.Л., Кумбе, К.Э.Н. *et al.* (2008) Сокращение количества опасных материалов и воздействие на окружающую среду за счет переработки отходов скандиевых наноматериалов. *Журнал Науки об окружающей среде и здоровье, часть А*, **43**, 357- 360.
- Янг Х., Гондикас А., Маринакос С.М. *et al.* (2012) Механизм образования наночастиц серебра-токсичность частиц зависит от растворенного серебра и поверхностного покрытия у *Caenorhabditis elegans*. *Наука и технология в области охраны окружающей среды*. doi: 10.1021 / es2024171t.
- Йокел, Р.А. и Макфейл, Р.К. (2011) Инженерные наноматериалы: воздействие, опасности и предотвращение рисков. *Журнал медицины труда и токсикологии*, **6**, 7.
- Чжан Р., Бай Ю., Чжан Б. (2011a) Потенциальный риск наночастиц титана для здоровья. *et al Журнал опасных материалов*. doi: 10.1016/j.jhazmat. 2011.11.022.
- Чжан Б., Ло Ю. и Ван К. (2011b) Разработка нанокompозита серебра / лактальбумина-положения: новый подход к снижению токсичности серебра. *Международный журнал по противомикробным средствам*, **38**, 502-509. Чжан Т., Ким Б., Левард С. *et al.* (2012) Метилирование ртути бактериями, подвергшимися воздействию растворенных наночастиц и микрочастиц сульфидов ртути. *Наука и технология в области охраны окружающей среды*. doi: 10.1021/es203181m Чжан М., Су Л. и Мао Л. (2006) Функционализация углеродных нанотрубок поверхностно-активными веществами (УНТ) для послойной сборки многослойных пленок из УНТ и изготовления золота наночастицы/наногибрид УНТ. *Углерод*, **44**, 276-283. Чжу М., Ван Б., Ванг Ю. *et al*(2011) Эндотелиальная дисфункция и воспаление индуцированный воздействием наночастиц оксида железа: факторы риска раннего атеросклероза. *Письма по токсикологии*, **201**, 162 - 171.

Состояние окружающей среды в населенных Сред

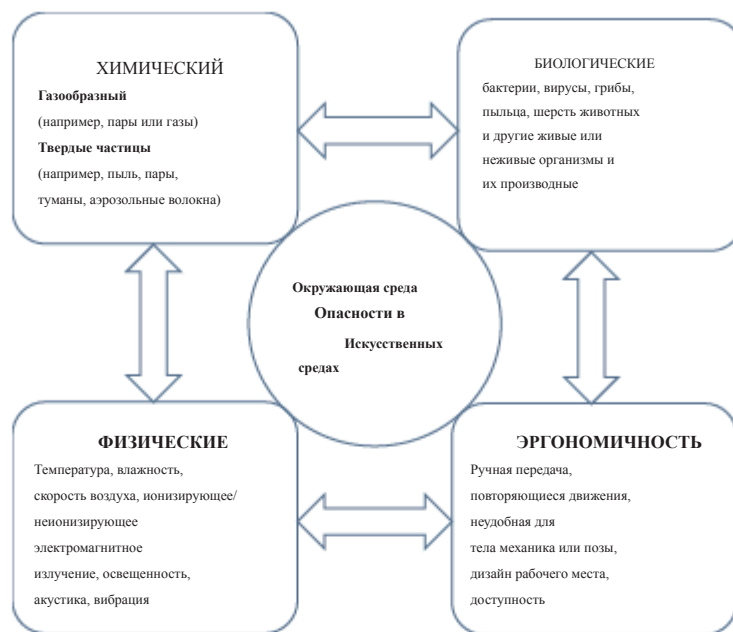
Захир Ахмад Насир

*Исследовательский центр здоровой инфраструктуры, Департамент гражданского, экологического & Геоматика
Инженерия, Университетский колледж Лондона, Великобритания*

14.1 Экологические опасности и искусственная среда обитания

Гигиена окружающей среды в искусственной среде имеет центральное значение для общественного здравоохранения. Существование широкого спектра загрязняющих веществ как внутреннего, так и наружного происхождения, большая мощность источников на единицу площади и большая доля времени, проводимого в различных помещениях, означают, что воздействие может оказывать значительное влияние на благополучие человека. Количество времени, проводимого в различных искусственных средах (жилых, производственных, транспортных и рекреационных), варьируется по всему миру. Однако люди во всем мире, как правило, проводят большую часть своего времени внутри, чем снаружи.

В широком смысле "искусственная среда" относится к "созданному человеком пространству, в котором люди живут, работают и воссоздают обстановку изо дня в день" (Roof and Oleru, 2008). Это материальный, пространственный и культурный продукт человеческого труда, который сочетает в себе физические элементы и энергию в формах, необходимых для жизни, работы и развлечений (Долман и Брукс, 2011). В XXI веке люди подвергаются целому ряду физических, химических, биологических и эргономических опасностей в различных искусственных средах. Во всем мире существуют значительные различия в степени подверженности этим опасностям из-за заметных различий в их типах и сильных сторонах; они тесно связаны с социально-экономическими изменениями. Экологические, социальные, экономические, политические, технологические и климатические изменения постоянно меняют принципы и практику в проектировании, строительстве, эксплуатации и управлении застроенной средой, приводя к сдвигам в



Экологические опасности, влияющие на самочувствие обитателей различных помещений **Рисунок 14.1** застроенные территории.

схемы воздействия и потенциал создания новых путей воздействия. На рисунке 14.1

показаны некоторые экологические опасности, которые могут повлиять на благополучие человека.

Имеется достаточный объем знаний о путях воздействия этих опасных веществ (вдыхание, контакт с кожей и / или всасывание, проглатывание), их уровнях в различных искусственных средах и их возможной связи с негативными последствиями для здоровья. Однако, что менее изучено, так это роль различных человеческих, социальных, экономических, политических и экологических факторов в проектировании, строительстве, использовании различных искусственных сред и управление ими, а также то, как их сложность и взаимосвязанность между собой могут влиять на пути воздействия этих опасностей. Степень риска для здоровья населения в различных искусственных средах зависит от характера и силы вредного воздействия опасности, социальной и физической уязвимости населения, восприимчивости подвергающихся воздействию лиц, а также концентрации и продолжительности воздействия. Следовательно, многочисленные факторы могут в значительной степени влиять на величину и продолжительность воздействия.

В большинстве современных моделей воздействия для прогнозирования воздействия на человека используются либо концентрации загрязняющих веществ на открытом воздухе, либо отдельные загрязняющие вещества в различных населенных пунктах. Однако для оценки общего риска воздействия существует острая необходимость рассчитать совокупное воздействие всех опасных факторов окружающей среды в застроенных помещениях. Этот подход окажет большую помощь в получении целостного понимания проблем охраны окружающей среды в различных застроенных средах и в разработке стратегий смягчения последствий и предотвращения, которые помогут снизить общую подверженность населения экологическим опасностям.

У этих опасностей есть множество источников, включая загрязнители окружающего воздуха, строительные материалы, мебель и обустройство (особенно влажную или отсыревшую мебель), жильцов и их средства личной гигиены, домашнюю уборку, техническое обслуживание и досуг, источники горения (нефть, газ, керосин, угольные и деревообрабатывающие приборы, табачные изделия), ксерокопирование / печать,

подземный транспорт, пестициды, органические химикаты, строительные технологии (системы кондиционирования, системы распределения воды), комнатные растения / животные, уличные растения / животные, заражение насекомыми, сельскохозяйственное и животноводческое производство, утилизация отходов, производство и упаковка, электрооборудование, плохая эргономика и доступность. Целый ряд факторов проектирования, конструирования, эксплуатации и управления может в значительной степени влиять на риск воздействия опасных факторов окружающей среды в застроенных помещениях. Примечательно, что, хотя проектирование и возведение застроенной среды являются неотъемлемыми элементами, ее использование и управление в значительной степени зависят от поведения жителей, на которое может влиять широкий спектр факторов. На рисунке 14.2 показаны различные факторы, влияющие на проектирование, сооружение, использование и управление застроенной средой, которые могут повлечь за собой воздействие различных экологических опасностей.

Стоит также отметить, что искусственную среду обитания, претерпевают изменения как в пространственном, и во временном отношении, а в том, что проектирование, строительство, использование и управление причине экологии и различных форм в географическом регионе, являются результатом сложных политических, социально-экономических и экологических факторов. Эти факторы постоянно изменяют параметры, влияющие на застроенную окружающую среду, что приводит к большим различиям в масштабах воздействия экологических опасностей по всему миру. Об этом свидетельствуют существенные различия в экологическом бремени болезней между странами с низким, средним и высоким уровнем дохода.



Факторы, влияющие на проектирование, строительство, использование и управление различными

14.2 встроенные среды.

14.2 Твердые частицы загрязняющих веществ

Твердые частицы (взвешенные в воздухе мелкие твердые и жидкие частицы различных размеров, форм и химических свойств) являются основным загрязнителем воздуха. Он может иметь как антропогенное, так и естественное происхождение и классифицируется в зависимости от его размера, процессов генерации и способности проникать в дыхательную систему человека (Morawska and Salthammer, 2003). Вкратце, частицы могут быть классифицированы по их размеру на основе: (i) их наблюдаемого модального распределения, (ii) предельного диаметра 50% или (iii) дозиметрических переменных, связанных с воздействием на человека. В категории (i) можно выделить несколько подкатегорий:

Режим образования зародышей: частицы диаметром < 10 нм.

Режим Айткена: частицы диаметром 10 нм $d < 100$ нм. $< <$

Режим накопления: частицы диаметром 0,1 мкм $d < < 1$ мкм.

Ультрадисперсные частицы: частицы в режимах Эйткина и нуклеации.

Мелкие частицы: включает режимы нуклеации, Эйткина и накопления.

Крупные частицы: частицы диаметром от 2 до 10 мкм. Здесь наиболее распространенное

деление - PM_{-10} и $PM_{2,5}$ и это широко используется для контроля качества окружающего воздуха стандарты.

Классификация в зависимости от места отложения в легких включает:

Вдыхаемая фракция : массовая доля всех частиц, находящихся в воздухе, которые вдыхаются через нос и рот.

Грудная фракция : массовая доля вдыхаемых частиц, которая проникает за пределы гортани.

Внегрудочная фракция : массовая доля всех вдыхаемых частиц, которая не проникает внутрь за пределы гортани.

Вдыхаемая фракция: массовая доля всех вдыхаемых частиц, которая проникает в альвеолярную область

Частицы в воздухе представляют собой сложную смесь, образующуюся из широкого спектра источников, и демонстрируют значительные различия в своей форме и распределении по размерам (см. Главу 2). Кроме того, попав в воздух, они подвергаются многочисленным процессам, взаимодействия и реакции, приводящие к изменению их химического состава и размера. Это происходит из-за множества физических и химических процессов, таких как зародышеобразование (образование новых частиц), конденсация, испарение, коагуляция, осаждение (как влажное, так и сухое), активация за счет воды и других газообразных компонентов и воднофазных реакций (Финлейсон-Питтс и Питтс, 2000; Сайнфельд и Пандис, 2006). Мелкие частицы образуются в основном в результате процессов горения, преобразования газа в частицу и фотохимических процессов, в то время как крупные частицы образуются в результате механических процессов. Для обозначения их размеров, процессов генерации и составных характеристик положения использовалась разная терминология (см. Главу 1).

Судьба частиц в воздухе в значительной степени определяется их физическими свойствами, особенно их размером. Размер аэрозольных частиц варьируется на несколько порядков, варьируясь от почти макроскопических размеров до размеров, близких к молекулярным (Hinds, 2005; Сейнфельд и Пандис, 2006). Распределение частиц по размерам является важнейшим параметром, определяющим динамику аэрозолей в атмосфере и их перенос, осаждение и время пребывания (Колбек и Лазаридис, 2010).

Что касается застроенных помещений, частицы, присутствующие в закрытых помещениях, могут иметь как внутренние, так и наружные источники. К ним относятся, но не ограничиваются ими: люди, находящиеся в помещении

(например, кожа, волосы, респираторные аэрозоли и т.д.), растения, домашние животные, деятельность по уборке и обслуживанию дома, строительные материалы и мебель, бытовые приборы, средства личной гигиены и табачные изделия (Morawska and Salthammer, 2003). Существует значительный разброс во вкладе различных источников в концентрацию частиц внутри помещений, и относительная важность источника зависит от мощности его выбросов и токсичности.

Некоторые источники выделяют частицы более или менее непрерывно, в то время как другие - с перерывами. В большинстве случаев частицы, образующиеся из разных источников или даже из одного и того же источника, могут отличаться по своей концентрации в зависимости от ряда факторов.

Согласно Моравской (2004), этими факторами являются:

1. тип, характер и количество источников
2. характеристики использования источников
3. характеристики здания
4. концентрация загрязняющих веществ на улице
5. скорость проникновения или вентиляции
6. смешивание воздуха
7. скорости удаления поверхностным путем, химические превращения или радиоактивный распад
8. наличие и эффективность систем удаления загрязняющих веществ из воздуха
9. метеорологические параметры.

Все эти факторы могут быть различными в различных средах и сильно влияют на выбор профессии-оказывать элементами проектирования, строительства, использования и управления. Таким образом, существуют существенные различия в концентрации частиц и их последующем воздействии в различных средах внутри помещений.

14.2.1 Перенос частиц и их поведение в искусственных средах

При испускании из источника частицы могут подвергаться ряду физических и химических процессов, которые также могут изменять их концентрацию (см. Главы 2 и 7). Эти процессы включают: осаждение, осаждение на поверхности, коагуляция и изменения в результате испарения или конденсации. Степень трансформации и время пребывания частиц в значительной степени зависят от типа источника. Например, выбросы от источников горения могут претерпевать гораздо более быстрые изменения, чем механически образованная пыль (Morawska, 2004). Ниже приведены наиболее важные процессы, влияющие на концентрацию частиц внутри помещений после выброса: инфильтрация, проникновение наружных частиц внутрь помещений, осаждение частиц, ресуспендирование частиц, вентиляция, фазовый переход, перемешивание и коагуляция. Ряд исследований был сосредоточен на измерении и моделировании динамики частиц внутри помещений. В расширенном обзоре Чен и Чжао (2011) обнаружили большие различия в инфильтрации (0,3-0,82 для

После полутора часов пребывания в помещении (PM₁₀) и коэффициенты проникновения (0,6-1,0 для частиц <2 мкм) в реальных зданиях. Они зависят от размера и зависят от многих других факторов (скорость воздухообмена, разница давлений внутри и снаружи, направление и скорость ветра, геометрия трещин в ограждающих конструкциях зданий). Аналогичным образом, во многих исследованиях была проведена количественная оценка скорости осаждения и ресуспендирования, было обнаружено, что осаждение частиц на поверхностях внутри помещений зависит от размера и что многие механизмы могут способствовать этому процессу (Лай, 2002; Уоллес, Эммерих и Ховард-Рид, 2004; Он, Моравска и Гилберт, 2005; Чен, Ю и Лай, 2006; Хуссейн *et al.*, 2006, 2009; Хамдани *et al.*, 2008). Адвекция и турбулентная диффузия обычно достаточно сильны, чтобы быстро переносить частицы из внутреннего воздуха в пограничные слои,

и, следовательно, об их нанесении на различные поверхности. Для ультрадисперсных частиц броуновская диффузия является важным механизмом осаждения, в то время как гравитационное осаждение, усиленное ударом, отвечает за осаждение крупных частиц. С другой стороны, частицы в режиме накопления осаждаются наименее эффективно (Назаров, 2004). Среди других факторов, влияющих на осаждение, увеличенный поток воздуха, площадь поверхности (Thatcher *et al.*, 2002) и поверхностные заряды (Lai, 2006).

Что касается ресуспендирувания, то многие бытовые действия и потоки воздуха в вентиляционных каналах могут привести к ресуспендируванию частиц. Ряд исследований продемонстрировали, что различные факторы (размер частиц, материал и шероховатость поверхности, скорость воздуха, состав частиц, положение, характеристики воздушного потока, относительная влажность) влияют на попадание частиц, ранее нанесенных на различные поверхности внутри помещений, в воздух (Бу, Дэвидсон и Рассел, 1992; Тэтчер и Лейтон, 1995; Ибрагим, Данн и Брах, 2003, 2004; Ферро, Копперуд и Хильдеманн, 2004; Гомес, Фрейхаут и Банфлет, 2007; Цянь и Ферро, 2008; Мукаи, Сигел и Новоселац, 2009; Шонесси и Бу, 2012; Голдастех, Ахмади и Ферро, 2012a, 2012b; Бур, Сигел и Новоселац, 2013; Кассаби *et al.*, 2013). Кроме того, помимо воздействия на уровни частиц внутри помещений, ресуспендирувание может обеспечить путь воздействия-путь для аллергенов и полупереносимых видов.

Вентиляция - процесс обмена воздуха в помещении с воздухом на открытом воздухе, является важным фактором в количественной оценке выбросов из закрытых источников. Три основных режима-механическим приточно-вытяжной вентиляции, естественной вентиляции и инфильтрации или утечек. Он *et al.* (2005) показали, что скорость вентиляции является важным фактором, влияющим на скорость осаждения частиц в диапазоне размеров 0,08 - 1,0 мкм. Интенсивность вентиляции существенно варьируется в зависимости от типа и местоположения здания, климата и образа жизни жителей (Моравска, 2004). Механические системы вентиляции обычно оснащаются волокнистыми фильтрами для ограничения проникновения загрязняющих веществ наружного воздуха в помещения. Эффективность системы фильтрации зависит от свойств фильтра и аэродинамического размера частиц (Джамриска, Моравска и Энсор, 2003).

Кроме того, частицы внутри помещений могут подвергаться процессам фазового перехода с участием паров и газов, которые приводят к образованию частиц и, следовательно, влияют на их количество и массовую концентрацию (Morawska, 2004). В предыдущих исследованиях сообщалось о ряде процессов фазового перехода, таких как рост, связанный с изменением условий влажности (Dua and Hopke, 1996), разделение по фазам полупереносимых органических соединений, обнаруженных между газовой фазой и сорбированных частицами, находящимися в воздухе внутри помещений (Weschler and Shields, 2003), образование вторичных органических частиц (Fan *et al.*, 2003; Сарвар *et al.*, 2003) и диссоциация частиц наружного воздуха на их газообразные составляющие (Lunden *et al.*, 2003). Коагуляция не влияет на массовую концентрацию, но может изменять распределение частиц по размерам, поэтому это может быть важно при высоких концентрациях. Однако Моравска (2004) утверждала, что значение коагуляции в влиянии на концентрацию в помещении ниже, чем значение другого процесса.

Из этого ясно, что многие факторы играют важную роль в определении судьбы находящихся внутри помещений частиц, и поэтому трудно изучать отдельные процессы. Однако важно подчеркнуть, что на большинство этих процессов будут в значительной степени влиять различные элементы проектирования, строительства, использования и управления искусственными средами. В обширном обзоре личного воздействия твердых частиц внутри помещений и оценки риска Morawska *et al.* (2013) предположили, что в развитых странах 10-30% общего бремени болезней от воздействия твердых частиц приходится на те, которые образуются в закрытых помещениях.

14.3 Газовые загрязняющие вещества

Класс газообразных загрязняющих веществ охватывает загрязняющие вещества, которые существуют в воздухе в виде атомов или свободных молекул и могут быть разделены на два важных подкласса: газы и пары. В таблице 14.1 показаны основные газообразные загрязняющие вещества, имеющие особое значение в промышленных средах, наряду с примерами и краткими описаниями их возникновения и использования.

Очевидно, что многие элементы конструкции, использованию и управлению причине экологические обладают потенциалом для того, чтобы загрязнить воздух газообразных загрязняющих веществ.

Было проведено большое количество исследований для изучения уровней этих загрязняющих веществ, особенно летучих органических соединений и неорганических га

Х 2 3

3

в различных искусственных средах по всему миру. Летучие органические соединения и карбонильные соединения в настоящее время привлекают наибольшее внимание, особенно в странах с высоким уровнем дохода, из-за их выделения строительными материалами, предметами интерьера (ковры, мебель из композитных материалов), внутренней отделкой (настенные покрытия, краски, клеи) и бытовой химией. Недавний отзыв Саригианниса *et al.* (2011) в отношении органических соединений (бензол, толуол, ксилолы, стирол, ацетальдегид, формальдегид, нафталин, лимонен, пинен и аммиак) сообщили, что их уровни сильно различаются внутри европейских стран и между ними из-за различий в их источниках и интенсивности выбросов.

14.3.1 Биологические опасности

Биологические агенты распространены повсеместно и могут происходить практически с любой естественной или искусственной поверхности, и каждый источник может давать начало совершенно уникальному комплексу биоаэрозолей (см.

Главу 16). Воздействие ветра на почву, взбалтывание открытой воды, попадание дождевых капель, животноводческие хозяйства, композиционные материалы, сбор урожая, системы ОВКВ (отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха - ing), промышленные процессы, предприятия пищевой промышленности и установки для очистки сточных вод - вот некоторые примеры основных наружных источников. Биоаэрозоли для помещений в основном имеют наружное происхождение (Burge, 1990; Леветин *et al.*, 1995), но строительные материалы, ковры, домашние животные, растения и системы кондиционирования воздуха могут повышать их уровень, особенно в помещениях с повышенной влажностью, которые могут обеспечивать субстрат / условия для роста и размножения микробов (Лехтонен, Репонен и Невалайнен, 1993; ДеКостер и Торн, 1995; Рен., 2001). Микроорганизмы *et al*

могут проникать в помещение через системы кондиционирования воздуха, двери, окна, трещины в стенах и систему подачи питьевой воды. Они также могут быть нанесены на обувь и

одежду людей (Pasanen *et al.*, 1989). Оказавшись в помещении, в диапазоне абиотических КВС-

ТЗ (вода, влажность, температура, питательные вещества, кислород и свет) определяет их роста на поверхностях внутри помещения. Действительно, искусственная среда - это сложные экосистемы, в которых существует сложная взаимосвязь между людьми, микроорганизмами и физическими структурами. В связи с растущим использованием молекулярных подходов был проведен ряд исследований для изучения микробиологии искусственных сред (Келли и Гилберт, 2013; Робертсон *et al.*, 2013). Было обнаружено, что характеристики здания (источники вентиляционного воздуха, скорость воздушного потока, относительная влажность и температура) влияют на разнообразие и состав бактериальных сообществ внутри помещений (Kembel *et al.*, 2012).

Имеется большой объем знаний об уровнях биоаэрозолей в различных искусственных средах, но очень часто основное внимание уделяется их аллергенному и токсическому потенциалу, при этом меньше внимания уделяется воздушно-капельным инфекциям. Целый ряд факторов может повысить вероятность передачи заболеваний по причине средах (см. Главу 11): повышение экспозиции

Краткий обзор основных химических групп газообразных загрязнителей воздуха и Таблица

14.1 их возникновение и использование (Адаптировано ASHRAE, 2009).

Семья	Пример	Возникновение и использование
Неорганические загрязнители		
Окислители	Озон, диоксид азота	Оба компонента вызывают коррозию и действуют как раздражители дыхательных путей
восстановители	Монооксид углерода	Монооксид углерода токсичен
Кислые газы	Диоксид углерода, водород хлорид, жидкий водород фтористый газ, сероводород, азотная кислота, диоксид серы, серная кислота	продукты сгорания топлива Диоксид углерода и водород сульфид имеют слабокислую реакцию. Сероводород является основным агентом в канализационных газах. Другие компоненты вызывают коррозию и раздражают дыхательные пути. Некоторые из важных наружных загрязняющих веществ
Соединения азота	Аммиак, гидразин, закись азота оксид	Для очистки используется аммиак продукты. Это сильный раздражитель. Гидразин используется в качестве антикоррозионного средства. Закись азота используется в эстетических целях
Органические загрязнители		
Хлорированные углеводороды	Четыреххлористый углерод, хлороформ, дихлорметан, 1,1,1-трихлорэтан, трихлорэтилен, тетрахлорэтилен, п-дихлорбензол	Дихлорбензол - используемое твердое вещество в качестве освежителя воздуха. Другие показанные жидкости являются эффективными неполярными растворителями. Некоторые из них используются в качестве обезжиривающих средств или в химической чистке
Спирты	Метанол, этанол, 2-пропанол (изопропанол), 3-метил-1-бутанол, этиленгликоль, 2-бутоксизтанол, фенол	Спирты сильно полярны. Некоторые используются в качестве растворителей в продуктах на водной основе. Фенол используется в качестве дезинфицирующего средства. 3-Метиловый 1-бутанол выделяется некоторыми плесеньями
Альдегиды	Формальдегид, ацетальдегид, акролеин, бензальдегид	. Формальдегид, ацетальдегид и акролеин имеют неприятный запах и является сильным раздражителем
Кетоны	2-Пропанон (ацетон), 2-бутанон (МЕК), метил изобутилкетон (MIBK), 2-гексанон	Кетоны средней полярности химические вещества. Ацетон и 2-гексанон выделяются некоторыми плесневыми грибами
Сложные эфиры	этилацетат, винилацетат, бутилацетат	Сложные эфиры имеют среднюю полярность химические вещества. Некоторые из них обладают приятным запахом и добавляются в качестве отдушек в потребительские товары

Таблица 14.1 (продолжение)

Семейство	Пример	Возникновение и применение
Ароматические углеводороды	Бензол, толуол, п-ксилол, стирол, 1,2,4-триметил бензол, нафталин, бенз- α -пирен	Бензол, толуол и ксилол являются широко используются в качестве растворителей и в производстве и повсеместно присутствуют в воздухе помещений. Нафталин используется в качестве репеллента от моли
Терпены	α -пинен, лимонен	Выделяются различные терпены древесиной. Два перечисленных здесь вещества обладают приятным запахом и используются в качестве отдушек в чистящих средствах, парфюмерии и так далее. Большинство гетероциклических соединений имеют среднюю
Гетероциклики	Окись этилена, тетрагидрофуран, 3-метил фуран, 1,4-диоксан, пиридин, никотин	полярность. Окись этилена используется в качестве дезинфицирующего средства. Тетрагидрофуран и пиридин используются в качестве растворителей. Никотин является компонентом табачного дыма

отдельные люди заражаются людьми в небольших закрытых помещениях, недостаточная вентиляция, рециркуляция загрязненного воздуха, увеличенная продолжительность воздействия и восприимчивость к нему человека. С годами было установлено, что плохие жилищные конструкции и условия (недостаточная вентиляция, ограниченное пространство и перенаселенность) повышают риск передачи заболеваний воздушно-капельным путем. Например, туберкулез (ТБ) долгое время ассоциировался с переполненными и плохо вентилируемыми помещениями (CCDA, 2007), поскольку существует повышенная вероятность вдыхания капель, выделяемых инфицированными людьми (Ваньеки *et al.*, 2006). Кроме того, вентиляция и движение воздуха в застроенных помещениях были тесно связаны с передачей инфекционных заболеваний воздушно-капельным путем (Li *et al.*, 2007).

После открытия антибиотиков более полувека назад были сделаны далеко идущие прогнозы о конце эры инфекционных заболеваний. Однако за последние 2 десятилетия стало казаться, что мы проигрываем битву с ними. Экологические, социальные, экономические, технологические и климатические изменения постоянно меняют циклы передачи заболеваний, что приводит к сдвигам в распределении, распространенности и тяжести существующих и вновь возникающих инфекционных заболеваний. Те, которые передаются воздушно-капельным путем, потенциально могут вызвать глобальные пандемии; они представляют серьезную угрозу для человечества XXI века. На рисунке 14.3 показаны переносимые по воздуху биологические угрозы, вызванные различными видами антропогенной деятельности, условиями и природными и антропогенными явлениями.

В медицинских учреждениях воздушно-капельная передача вируса кори, вируса ветряной оспы (*Ветряной оспы*), риновирусов, аденовирусов, *Золотистый стафилококк*, *Туберкулезные микобактерии* *losis* и *Аспергиллы* являются глобальной проблемой (CDC, 2003). Помимо человеческих источников, определенные медицинские процедуры (например, интубация, бронхоскопия), мероприятия по техническому обслуживанию зданий (например, строительство, снос, реконструкция и ремонт) и ежедневные процедуры уборки (например, стирка, постельное белье, медицинские отходы) повышают риск инфекций, связанных со здоровьем (HCAIs). Во всем мире HCAIs являются причиной значительной смертности и финансового бремени

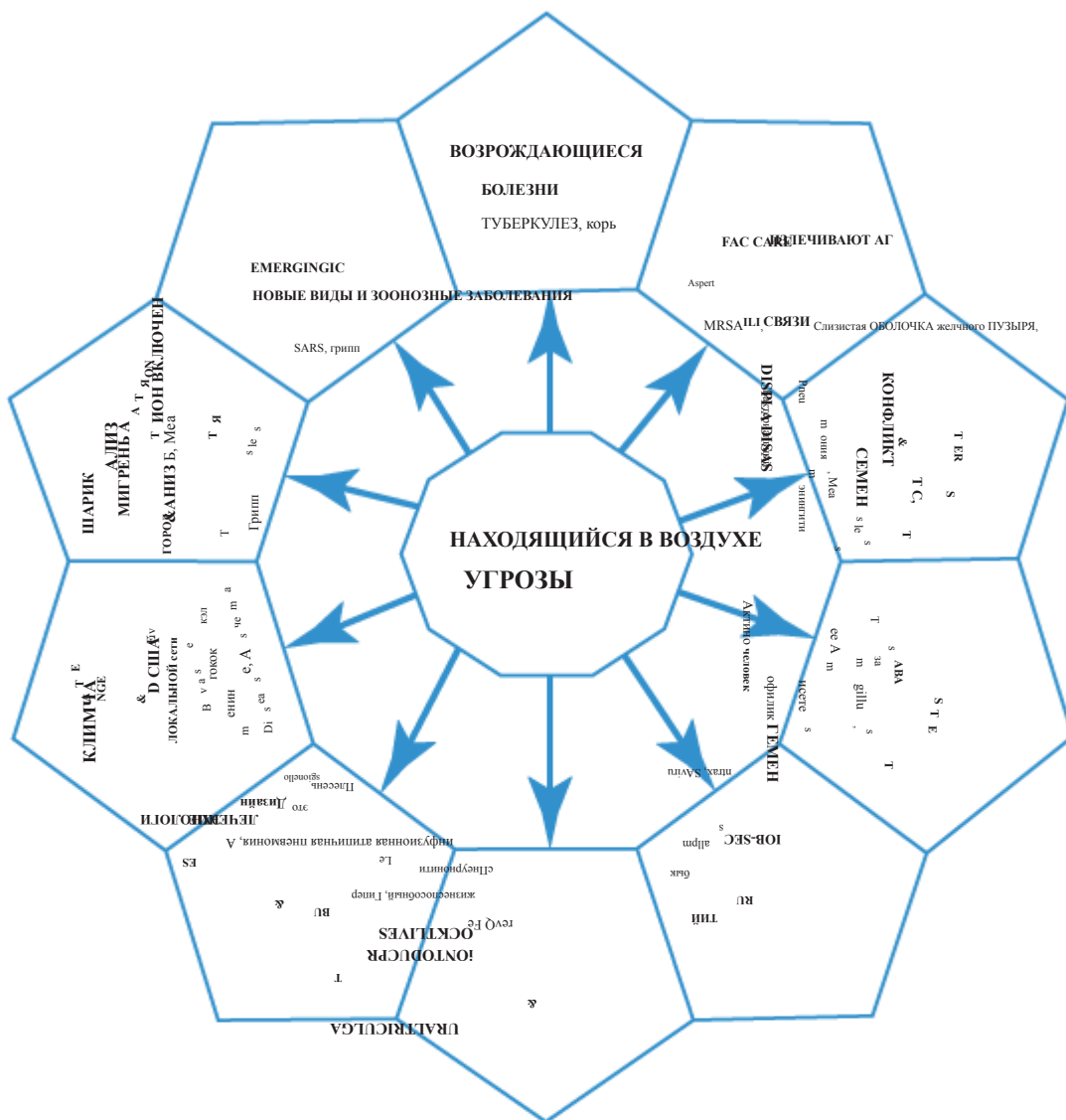


Рисунок 14.3

Текущие и будущие угрозы, связанные с передачей заболеваний воздушно-капельным путем.

в системах здравоохранения. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), в 2011 году распространенность HCAI в развитых и развивающихся странах составила 7,6 и 10,1% соответственно. В Европе HCAI являются причиной 16 миллионов дополнительных дней пребывания в больнице, 37 000 связанных с этим смертей и ежегодных финансовых потерь в размере до 7 миллиардов евро (ВОЗ, 2011).

Аналогичным образом, процессы обращения с отходами связаны с повышенным воздействием микроорганизмов, переносимых воздухом, и их токсинов. Различные механические воздействия, связанные с этими процессами, приводят к размножению значительного количества микроорганизмов и их типов, переносимых воздушно-капельным путем, которые могут представлять потенциальную опасность для здоровья работников и тех, кто находится поблизости. Однако степень воздействия на человека микроорганизмов, переносимых воздушно-капельным путем, может варьироваться в зависимости от типа и мощности этих объектов, выполняемой там деятельности и метеорологических условий (Swan *et al.*, 2003; Стэгт *et al.*, 2010; Корженевская, 2011; Дехгани *et al.*, 2012).

Стихийные бедствия и конфликты также могут стать раем для передачи болезней из-за массового перемещения населения, внезапных изменений окружающей среды, потери коммунальных услуг, нарушения работы основных медицинских учреждений и повышенной уязвимости людей. Передаваемые воздушно-капельным путем заболевания, такие как пневмония, корь и бактериальный менингит, имеют эпидемический потенциал во время засух, цунами, торнадо, землетрясений и наводнений. Переполненность, плохая вентиляция, недостаточная гигиена в закрытых помещениях, недостаток питания и ограниченный доступ к медицинским учреждениям - все это повышает риск острых респираторных инфекций (ВОЗ, 2006; Watson, Gayer and Connolly, 2007; Куадио *et al.*, 2012).

Климат, сезонность и изменение климата влияют на распространенность и географическое распределение воздушно-капельных инфекций. Например, эпидемическая активность респираторно-синцитиального вируса (RSV) связана с метеорологическими условиями. В тропических климатических условиях пик РСВ-инфекции приходится на лето и начало осени, в то время как в странах с умеренным климатом уровень РСВ-инфекции самый высокий зимой (Yusuf *et al.*, 2007). Аналогичным образом, уровень заболеваемости и географическому дистрибуции инвазивной менингококковой инфекции (ИМД), скорее всего, будут затронуты изменением климата (Палмгрен, 2009). Предполагается, что недавнее появление (естественно ограниченное тропическими и субтропическими регионами) *Криптококкоз гатти* в более умеренном климате Тихоокеанского Северо-запада США связано с изменением климата (Куни, 2011).

Изменение климата может также увеличить продолжительность сезона сбора пыльцы и изменить пространственное распределение растительности и региональное производство пыльцы (Беггс и Бамбрик, 2005; IPCC, 2007), в результате чего люди с аллергическим ринитом и астмой подвергаются повышенному риску обострения. Кроме того, более частые осадки наряду с уплотнением городов и изменениями в землепользовании, особенно на пойменных равнинах, увеличили риск и серьезность городских наводнений, что может оказать глубокое влияние на передачу заболеваний воздушно-капельным путем. Например, наводнения могут спровоцировать интенсивный рост биологических агентов (например, плесени, бактерий) из-за сырости поверхностей, конструкций и воздуха в зданиях, что приводит к повышенному воздействию на жильцов аэроаллергенов, микотоксинов, эндотоксинов, β -глюканов, летучих органических соединений и инфекций (ВОЗ, 2009).

Воздушно-капельная передача новых и зарождающихся зоонозных заболеваний имеет серьезный эпидемический потенциал. Например, тяжелый острый респираторный синдром (ТОРС) и птичий грипп могут стать пандемиями. Пандемия гриппа H1N1 1918-1919 годов, унесшая жизни, по оценкам, 50-100 миллионов человек, ясно показывает серьезность и последствия такого события, а недавнее распространение вирусов птичьего гриппа H5N1 подчеркивает высокий риск возникновения пандемии (Morens and Fauci, 2007). Из-за усиления воздействия факторов, связанных с человеком, патогенами и окружающей средой / климатом, влияющих на возникновение инфекционных заболеваний, весьма вероятно, что большая часть будущих вспышек инфекционных заболеваний, вызванных новым или рецидивирующим агентом, будет зоонозной (Cascio *et al.*, 2011). Помимо серьезного вреда для здоровья человека, пандемия может привести к большому социальному и экономическому ущербу.

Наряду с новыми и зарождающимися заболеваниями, воздушно-капельная передача вновь возникающих инфекционных заболеваний также представляет огромную угрозу для человечества. Например, туберкулез является растущей проблемой во всем мире. В 2009 году 1,7 миллиона человек во всем мире умерли от туберкулеза, и, по оценкам, было зарегистрировано 9,4 миллиона новых случаев (ВОЗ, 2010a). Возникающая угроза туберкулеза с множественной лекарственной устойчивостью (МЛУ-ТБ) и туберкулеза с широкой лекарственной устойчивостью (ШЛУ-ТБ) является серьезной проблемой глобального здравоохранения. В 2008 году, по оценкам, было 390 000-510 000 случаев МЛУ-ТБ: 3,6% от всех зарегистрированных случаев туберкулеза. У 5,4% случаев МЛУ-ТБ был выявлен ШЛУ-ТБ (ВОЗ, 2010b). Недавно в Мумбаи, Индия, были зарегистрированы случаи полностью лекарственно устойчивого туберкулеза (TDR-TB) (Loewenberg, 2012).

Глобализация, рост числа поездок, миграция и урбанизация могут влиять на распространенность, географическое распространение и тяжесть инфекционных заболеваний в определенных группах населения, повторное появление ранее известных патогенов и появление новых патогенов из-за изменений биологических, социальных и экологических факторов, связанных с этими явлениями (ВОЗ, 2004; Ка-Вай Хуэй, 2006; Алирол *et al.*, 2011). Общее число международных мигрантов увеличилось с примерно 178 миллионов в 2000 году до 213 миллионов в 2010 году (ООН ДЭСВ, 2009). В 2010 году впервые более 50% населения мира проживало в городских районах (Организация Объединенных Наций, 2010). Урбанизация все больше влияет на эпидемиологические характеристики инфекционных заболеваний и оказывает глубокое воздействие на глобальное здравоохранение. В странах с низким уровнем дохода урбанизация может привести к развитию трущоб и трущобных поселков с плохими жилищными условиями, которые способствуют распространению заболеваний, передаваемых воздушно-капельным путем. Высокая плотность населения и увеличенный объем общего пространства, неоднородность состояния здоровья и возросшая мобильность в городских районах - все это усиливает подверженность гриппу, кори и туберкулезу. Фактически, густонаселенные города стали центрами глобального распространения заболеваний, передаваемых воздушно-капельным путем, таких как SARS и грипп H1N1 (Alirol *et al.*, 2011).

Продолжающийся переход от традиционного сельского хозяйства и животноводства к интенсивным системам промышленного производства как в развивающихся, так и в развитых странах представляет значительную угрозу для глобального общественного здравоохранения, сопряженную с риском не только увеличения распространенности уже известных инфекционных заболеваний, но и появления новых патогенов. Концентрации бактерий с множественной лекарственной устойчивостью были обнаружены на расстоянии до 150 м с подветренной стороны от свиноводческого комплекса (Гиббс, 2006). Аналогичным образом, появление метициллинрезистентности, связанной с домашними животными, *S. aureus* ST398 (LA-MRSA) и его передача людям ясно демонстрируют потенциал появления новых патогенов (Smith and Pearson, 2011). В условиях сельскохозяйственных работ биоаэрозоли и их вторичные метаболиты могут быть причиной аллергического ринита, токсического пневмонита, пневмонита повышенной чувствительности и астмы (Дуткевич *et al.*, 2011).

Такие технологии, как системы кондиционирования, градирни и архитектурные фонтаны, потенциально могут содержать инфекционные патогены (например, *Legionella*) и способствуют их воздушно-капельной передаче. Более широкое использование механических систем кондиционирования воздуха и влажного охлаждения может привести к увеличению числа случаев заболевания легионеров. Строительные конструкции, а также может увеличить экспозицию проживающих в воздухе патогенных микроорганизмов. Энергосберегающие и экологически Сус-приземленная зданий (зеленый работ), вызывают большой интерес в последние годы. Однако некоторые из их компонентов могут обеспечивать экологические ниши для роста микроорганизмов и для путей распространения в замкнутых пространствах. Например, использование зеленых крыш и зеленых атриумов может способствовать распространению патогенов человека, связанных с почвой (Morey, 2010). В дополнение к этому, построить-жесткий подход (снижение разрежения воздуха в помещении), могут усилить действие, как-likelihood воздушно-капельной инфекции. Современные технологии и проектирование зданий в большей степени ориентированы на энергосбережение, чем на охрану здоровья населения.

Более того, биологические агенты могут быть тайно приготовлены, транспортированы и преднамеренно выпущены террористами и государствами-изгоями. Воздушно-капельная передача этих оружейных патогенов представляет значительный риск для населения мира. Например, преднамеренное распространение *Сибирской язвы* через почтовые службы в США в 2001 году ясно показывает угрозу (Лейн, Ла Монтань и Фаучи, 2001). Кроме того, случайное высвобождение биологических агентов из лабораторных помещений также вызывает серьезную озабоченность и может создать значительную угрозу для населения. Текущие исследования вирусов птичьего гриппа (H5N1) и недавний отчет о рекомбинантном вирусе (H5 NA, передающийся хорькам) вызвали широкую озабоченность по поводу

разработка и поддержание этих модифицированных штаммов (Фушье, Гарсия-Састре и Каваока, 2012; Мюллер, 2012). Таким образом, мы сталкиваемся с широким спектром воздушных угроз, что требует нового внимания к борьбе с биологическими агентами, находящимися в воздухе.

Ряд факторов проектирования, конструирования, использования и управления (представлены на рисунке 14.2) могут способствовать передаче заболеваний воздушно-капельным путем. Вспышка атипичной пневмонии в жилом комплексе (Сады Амой) в Гонконге в 2003 году продемонстрировала, как элементы жилья и окружающая среда могут способствовать передаче инфекционных заболеваний воздушно-капельным путем (Ю. *et al.*, 2004). Аналогичным образом, вспышки болезни легионеров подчеркивают потенциальную возможность того, что застроенная окружающая среда может выступать в качестве резервуара инфекционных патогенов и способствовать их передаче. Таким образом, существует острая необходимость переосмысления роли искусственной среды в передаче заболеваний воздушно-капельным путем. Необходимо уделять больше внимания последствиям существующей практики в проектировании, сооружении, использовании искусственных сред и управлении ими для передачи заболеваний воздушно-капельным путем.

14.3.2 Физические опасности

Физические опасности в застроенных помещениях связаны с тепловыми условиями (температура, влажность, скорость воздуха, энергия излучения), электромагнитным излучением, а также визуальными и акустическими условиями. Физические факторы могут оказывать непосредственное воздействие не только на жильцов, но и на другие факторы качества окружающей среды. Британский стандарт BS EN ISO 7730 определяет тепловой комфорт как "то душевное состояние, которое выражает удовлетворение тепловой средой". Именно психологическое состояние человека, а также ряд экологических и личных факторов влияют на удовлетворенность жильцов тепловыми условиями в различных застроенных помещениях. По данным британского управления охраны труда и промышленной безопасности (HSE), температура воздуха, температура излучения, скорость движения воздуха, влажность, теплоизоляция одежды и скорость обмена веществ - все это влияет на тепловой комфорт работника. Для измерения теплового комфорта широко использовались прогнозируемое среднее число голосов (PMV) и процентный показатель неудовлетворенности людей (PPD) общим тепловым комфортом и коэффициент тяги (DR) для локального теплового дискомфорта. Подробную информацию о методах, используемых для прогнозирования общего теплового ощущения и тепловой неудовлетворенности, а также о критериальных требованиях можно найти в стандартах BS EN ISO 7730, BS EN ISO 10551 (субъективный метод) и стандарте ANSI / ASHRAE 55-2010. Недавно, Дорогой *et al.* (2013) проанализировали исследования теплового комфорта за последние 20 лет и обсудили основные тенденции, прогресс и изменения парадигмы в этой области.

Доступны проектные критерии для факторов окружающей среды, влияющих на тепловой комфорт людей в построенных помещениях (например, руководство CIBSE A - Environmental Design), но выбор подходящих проектных условий по-прежнему очень сложен из-за субъективного характера восприятия комфорта. Основная цель - обеспечить большинству людей тепловой комфорт большую часть времени. По данным НИУ ВШЭ, разумным пределом для минимального количества людей, которые должны чувствовать тепловой комфорт в данной среде, является 80% проживающих.

За последнее столетие в электромагнитные поля были внесены значительные изменения в искусственных средах. Растущий объем электрооборудования и протяженность беспроводной инфраструктуры вызвали опасения по поводу электромагнитного загрязнения. Воздействие электромагнитных полей на здоровье и нормы выбросов были подробно рассмотрены Клементсом-Крумом (Clements-Croome, 2012). Электромагнитная совместимость в настоящее время является ключевым аспектом проектирования (Lock, 2012), и недавно в ряде работ рассматривались последствия изменения электромагнитной природы искусственной среды для благополучия человека (Джеймисон

et al., 2010, 2011; Xing, 2012). Свет может оказывать биологическое, поведенческое и психологическое воздействие на людей (например, циркадный ритм, температуру тела, настроение / поведение, уровень активности). Имеется большое количество доступной литературы о влиянии света на благополучие человека и наблюдается растущая тенденция к максимальному использованию дневного света в зданиях (CIE, 2004; Webb, 2006; Боусе, 2010; Тодорович и Ким, 2012; Вейч и Галасиу, 2012). Звук и вибрации, также может повлиять на благополучие: чрезмерный шум может вызывать раздражение, нарушение разборчивости речи и даже повреждению слуха; кроме того, вибрация может иметь как физико-химических и биологических эффектов, в зависимости от его величины и частоты. Кодексы практики и руководства по контролю шума и вибрации в различных строительных средах были предложены различными организациями (например, British standards, ASHRAE).

14.3.3 Эргономические опасности

Согласно Международной эргономической ассоциации, эргономика (или "человеческий фактор") - это "научная дисциплина, занимающаяся пониманием взаимодействий между людьми и другими элементами системы, и профессия, которая применяет теоретические принципы, данные и методы для проектирования с целью оптимизации благополучия человека и общей производительности системы".....". Эргономичный дизайн различных элементов в построенных помещениях (например, планировка рабочего места) помогает людям комфортно и эффективно взаимодействовать с окружающей средой, что приводит к повышению производительности и улучшению условий труда. Хорошая эргономика позволяет окружающей среде соответствовать физической активности пассажиров, а не вынуждает пассажиров приспосабливать свои действия к окружающей среде. С другой стороны, плохой эргономичный дизайн может привести не только к низкой производительности, но и ко многим нарушениям зрения и опорно-двигательного аппарата / накопленным травматическим нарушениям / повторяющимся травмам от перенапряжения. Кроме того, плохая эргономика помещения может привести к внесению изменений во время эксплуатации здания, что может оказать значительное влияние на состояние окружающей среды в помещении. Например, расположение и количество рабочих мест, шкафов, принтеров и другого оборудования могут нарушать воздушные потоки, регулирование гигротермии и вентиляцию. Во время ремонта или переделки может быть упущена из виду необходимость эффективной вентиляции. Часто эти изменения направлены на эффективность использования пространства или эстетику, и они, скорее всего, будут внесены без изменений в первоначальную конструкцию вентиляции. Проблемы с охраной окружающей среды часто возникают из-за плохой планировки помещения и высокой плотности пассажиров, особенно в застроенных помещениях, связанных с работой. Очень вероятно, что помещение с низкой плотностью пассажиров в пересчете на площадь пола будет иметь высокую "чистую плотность персонала" из-за концентрации рабочих мест в небольшом пространстве. Исследования показали повышение производительности и комфорта, а также снижение жалоб со стороны опорно-двигательного аппарата в результате хороших эргономических характеристик конструкции (Дайнофф, Фрейзер и Тейлор, 1982; Смит и Байе, 2003; Хемфала и Эклунд, 2012).

Воздействие опасностей для здоровья из окружающей среды в застроенных помещениях представляет собой сложный процесс. Непосредственные факторы, определяющие повышенное воздействие окружающей среды, могут включать неадекватную вентиляцию, неэффективное перемешивание воздуха, плохую эргономику и неадекватное управление помещением. Дистальные детерминанты гораздо сложнее, и их часто упускают из виду. Застроенная среда претерпевает изменения как пространственно, так и во времени, а ее проектирование и управление в географическом регионе являются результатом сложных политических, социально-экономических и экологических факторов (рисунок 14.4). Политические факторы включают политику и регулирование

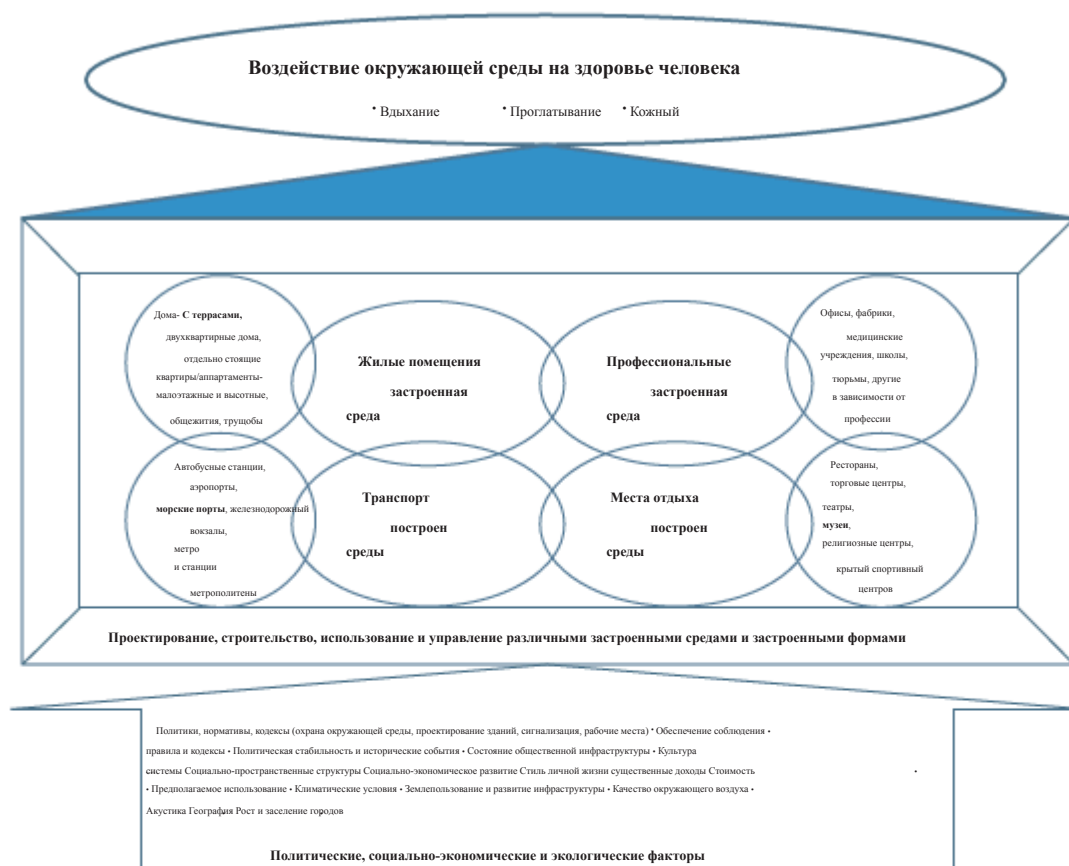


Рисунок 14.4

Подверженность экологическим опасностям для здоровья в различных населенных пунктах.

касающиеся проектирования и строительства, а также их применения. Социально-экономические факторы включают основы личного образа жизни и культурные системы. Факторы окружающей среды включают землепользование, рост городов и их уплотнение. Таким образом, разработка и внедрение эффективных мероприятий / стратегий по снижению риска воздействия различных экологических опасностей в застроенных помещениях могут быть достигнуты только при соблюдении целостного системного подхода, который учитывает способы воздействия политических, социальных, экономических и природных факторов на проектирование, строительство, использование различных застроенных помещений и управление ими.

14.3.4 Вентиляция и экологические опасности

Вентиляция является одним из наиболее важных факторов снижения риска воздействия целого ряда загрязняющих веществ на воздух в жилых помещениях. В конструкции вентиляции за последнее столетие произошел сдвиг в ее роли от борьбы с инфекцией к простому тепловому комфорту. В девятнадцатом и начале двадцатого веков, когда туберкулез и другие инфекционные заболевания были обычным явлением, для минимизации риска заражения были рекомендованы высокие показатели вентиляции легких. С уменьшением эпидемических заболеваний, благодаря улучшению санитарии, гигиены и общественного здравоохранения, соотношение функций вентиляции начало смещаться с борьбы с инфекцией на создание комфортных условий.

условия и удаление запаха (Мастон и Шерман, 2004). Энергетический кризис в конце 1970-х годов привел к дальнейшему снижению скорости вентиляции за счет герметизации зданий, чтобы уменьшить проникновение воздуха и повысить энергоэффективность. Однако позже в том же десятилетии распространенность синдрома больного здания была объяснена возникшей в результате этого недостаточной вентиляцией (Mendell and Fine, 1994). Современные здания разработаны, чтобы быть энергетической эффективностью, а не для улучшения санитарного состояния окружающей среды и предотвращения заболеваний, но за последние несколько десятилетий возрастает при инфекционных заболеваниях и респираторных заболеваниях, подчеркнули важность вентиляции. Хобдей (Hobday, 2010) заявил, что концепция о том, что жилье должно поддерживать и укреплять здоровье и благополучие его обитателей, была превзойдена соображениями энергоэффективности, и что с годами взаимодействие между жилищными и медицинскими работниками пошло на убыль. В обзоре роли вентиляции в передаче инфекционных агентов воздушно-капельным путем, Ли *et al*. (2007) пришли к выводу, что вентиляция и движение воздуха тесно связаны с распространением заболеваний в застроенных помещениях. Кроме того, они утверждали, что в большинстве эпидемиологических исследований использовались неадекватные методы изучения вентиляции и движения воздушных потоков, что отражает отсутствие взаимодействия между эпидемиологами, микробиологами и инженерами-строителями. Данные о скорости вентиляции ограничены, но доступная информация подчеркивает, что использование вентиляционной системы и управление ею значительно влияют на ее общую производительность. Повышенное внимание к энергосбережению привело к внедрению энергоэффективных конструкций и строительству высокоизолированных, воздухонепроницаемых конструкций с более широким использованием систем механической вентиляции с рекуперацией тепла (MVHR). В недавнем обзоре вентиляции в европейских жилищах пришел к выводу, что, несмотря на растущее признание вентиляции, как важного компонента здорового жилища, на практике в VEN-tilation бедная и большая часть жилищ нехватка воздуха под наркозом (менее 0.5 сек^{-1}

(Димитрулопулу, 2011). Кроме того, в различных застроенных средах, особенно в жилых помещениях, на транспорте и в других местах отдыха, эксплуатация, техническое обслуживание и управление объектами (например, системами ОВКВ, системы водоснабжения) со стороны руководства может оказывать значительное влияние на общее состояние окружающей среды. Более того, степень взаимодействия между руководством объектов и организациями, использующими застроенную среду, а также их знания о совокупном воздействии различных экологических опасностей, имеют жизненно важную роль в обеспечении надлежащего состояния окружающей среды. Недостаток знаний и осведомленности о различных экологических опасностях среди обитателей застроенных территорий, персонала, ответственного за охрану труда и технику безопасности на производстве, а также за управление объектами, может привести к усилению воздействия различных экологических опасностей. Например, неправильная эксплуатация и некачественное техническое обслуживание систем вентиляции и кондиционирования во время пребывания в здании могут привести к недостаточной скорости вентиляции и плохому распределению воздуха, что, в свою очередь, повышает риск воздействия ряда загрязняющих веществ в воздухе. Кроме того, стоит использовать хорошее освещение, поскольку очень часто потребность в вентиляции определяется психологическими и физиологическими потребностями жильцов и что помещения с гибридной конструкцией вентиляции (механическая и естественная вентиляция) могут приводить к неконтролируемой вентиляции и перемешиванию воздуха в зависимости от расположения открытых окон и дверей и того, как долго они остаются открытыми. Естественная вентиляция может обеспечить более высокую скорость воздухообмена при меньших затратах и меньших затратах на техническое обслуживание, чем механическая вентиляция. Однако важно учитывать качество наружного воздуха. Большое количество исследований показало связь между загрязнением окружающего воздуха и заболеваемостью. Требуется не только продуманный дизайн новых зданий, но и рациональное использование существующих застроек, чтобы уменьшить подверженность различным экологическим опасностям.

Энергоэффективная застройка, изменение климата и окружающая среда 14.3.5

Здоровье

Из-за их совокупного воздействия на истощение и деградацию природных ресурсов, образование и накопление отходов, экосистемы и изменение климата правительства по всему миру выдвигают новые стратегии, законы и стандарты для уменьшения воздействия застроенной территории на окружающую среду. Следовательно, в зависимости от применения этих законов заинтересованные стороны сталкиваются с новыми, сложными и быстро меняющимися проблемами, что приводит к значительным изменениям в проектировании и строительстве застроенных территорий. Чтобы сократить выбросы углекислого газа, энергоэффективность стала руководящей парадигмой для создания нового вида застроенной среды. Однако повышенное внимание к энергоэффективности вызвало беспокойство по поводу того, что различные факторы, связанные с проектированием, строительством и эксплуатацией энергоэффективных зданий, могут повышать уязвимость их обитателей к опасным факторам окружающей среды, особенно загрязнителям, находящимся в воздухе. В последние годы правительства во всем развитом мире сосредоточили свое внимание на жилищном строительстве из-за его значительной доли в потреблении энергии (например, коды для экологически чистых домов включают "PassivHaus", "Smart Energy Home", "R-2000 homes", "indoor AirPlus"). Правительство Великобритании намерено, что все новые дома в Англии будут без выбросов углекислого газа к 2016 году. Этот подход / политика предполагает большую герметичность ограждающей конструкции здания с целью повышения энергоэффективности, и застройщики и владельцы высказывали опасения по поводу проблем, связанных с плохим качеством воздуха в помещениях (Davis and Harvey, 2008). Ожидается, что дома, построенные в соответствии с уровнем 4 кодекса экологически чистых домов, будут использовать MVHR для соответствия требованиям к энергопотреблению и качеству воздуха в помещениях. Stump *et al.* (2009) провели обширный обзор качества воздуха в помещениях в высокоэффективных домах, эффективности вентиляции при строительстве жилых помещений и организации вентиляции в домах с высокой энергоэффективностью и пришли к выводу, что в этой области недостаточно знаний и что необходимы дополнительные исследования.

В последние годы долгосрочные проблемы изменения климата и его потенциальное воздействие на качество воздуха в помещениях и здоровье населения рассматривались в многочисленных публикациях. В отчете Института медицины (ИОМ) сделан вывод, что обширный объем литературы указывает на то, что плохое качество окружающей среды в помещениях создает проблемы для здоровья, но что нет недостаточных доказательств, позволяющих связать вызванные изменением климата изменения в окружающей среде внутри помещений с какими-либо конкретными неблагоприятными последствиями для здоровья. Однако изменение климата может усугубить существующие экологические проблемы внутри помещений и привести к возникновению новых (MOM, 2011). Основываясь на отчете MOM, Шпенглер (2012) и Назаровф (2013) обобщили и обсудили последствия изменения климата для качества воздуха в помещениях. В отчете Stump (2011) о воздействии на здоровье, вызванном изменениями в окружающей среде внутри помещений в Великобритании, также рассматриваются изменения, вызванные смягчением последствий и принятием мер в результате изменения климата. Кроме того, в недавнем отчете Агентства по охране здоровья Великобритании о последствиях изменения климата для здоровья (НРА, 2012) сделан вывод, что изменение климата потенциально может изменить риски в жилых помещениях, усугубляя существующие риски для здоровья, связанные с загрязнителями воздуха внутри помещений.

Флоренс Найтингейл (1820-1910) признала, что "связь между здоровьем и жилищами населения является одной из самых важных из существующих". Это утверждение остается верным и сегодня. Очевидно, что наука об аэрозолях играет центральную роль в улучшении санитарного состояния окружающей среды в искусственной среде. Она опирается на многочисленные отрасли науки, включая вентиляцию, аэриологию, химию, нанотехнологии, профессиональное облучение и многое другое.

Ссылки

- Алирол Э., Гетаз Л., Столл Б. *et al.* (2011) урбанизация и инфекционных заболеваний в Глоб-
alised мира. *Ланцет Инфекционных Заболеваний*, **11**, 131 - 141.
- ASHRAE (2009) Загрязнители воздуха, в разделе *Руководство ASHRAE - основы (I-P издание)*,
Американское общество инженеров по отоплению, охлаждению и
кондиционированию воздуха, Inc., pp. 11-1 - 11-22. Беггс, П.Дж. и Бамбрик, Х.Дж. (2005)
Является ли глобальный рост астмы ранним воздействием антропогенных факторов? -
пагубное изменение климата? *Перспективы охраны окружающей среды*, **113**(8), 915 - 919.
- Грубиян, Б.Э., Сигел Дж.А. и Новоселац А. (2013) Исследование аэродинамических характеристик в аэродинамической трубе
ресуспандирование частиц из монослойных и многослойных
отложений на линолеумных полах и оцинкованном *Нанотехнология в области аэрозолей* . doi: 10.1080/02786826
металле. .2013.794929. Бойс, П. Р. (2010) Обзор: влияние освещения
в зданиях на здоровье человека. *В помещениях и*
Искусственная среда, **19** , 8- 20.
- Бердж, Х. (1990) Биоаэрозоли: распространенность и воздействие на здоровье в помещении.
Журнал аллергологии и клинической иммунологии , **86**, 687 -701.
- Кассио, А., Босильковский, М., Родригес-Моралес, А.Дж. и Паппас, Г. (2011) Социально-
экология зоонозных инфекций. *Клиническая микробиология и инфекция* **17**, с. 336-342.
- CCDA (2007) Жилищные условия, которые служат факторами риска заражения туберкулезом
и болезни. *Отчет Канады по инфекционным заболеваниям*, **33**(ОКС 9).
- CDC (Центры по контролю и профилактике заболеваний) (2003) Руководящие принципы по охране окружающей среды
Инфекционный контроль в медицинских учреждениях: рекомендации CDC и
Консультативного комитета по практике инфекционного контроля в области
здравоохранения (НПСРАС), Департамент США здравоохранения и социальных служб, Центры
по контролю и профилактике заболеваний (CDC), Атланта, Джорджия. Чен Ф.,
Юй С.К.М. и Лай А.К.К. (2006) Моделирование распределения частиц и осаждения-
для внутренних помещений с новой моделью дрейфового потока. *Атмосферная среда*, **40**,
357 - 367. Чен,
С. и Чжао, Б. (2011) Обзор взаимосвязи между частицами внутри и снаружи помещений:
Соотношение ввода-вывода, коэффициент инфильтрации и коэффициент проникновения. *Атмосферная среда*, **45**(2),
275-288.
- CIE (2004) Влияние освещения глаз на физиологию и поведение человека, Комиссия
Internationale de l'Eclairage Publication, p. 158.
- Клементс-Крум, Д. (ред.) (2012) *Электромагнитная среда и здоровье в зданиях*,
Ратледж.
- Колбек, И. и Лазаридис, М. (2010) Аэрозоли и загрязнение окружающей среды. *Naturwis-
senschaften*, **97**, 117- 131.
- Кун, К.М. (2011) Изменение климата и инфекционные заболевания: наступило ли будущее? *Environ-
перспективы психического здоровья*, **119**, а394.
- Крамп, Д. (2011) *Изменение климата - воздействие на здоровье из-за изменений в окружающей среде внутри помещений-
потребности в исследованиях*, Институт окружающей среды и здоровья, Крэнфилдский университет.
- Крамп Д., Денгель А. и Суэйнсон М. (2009) Качество воздуха в помещениях с высоким энергопотреблением
Эффективные дома: обзор, Отчет Фонда NHBC NF18, Национальный
совет по жилищному строительству , Милтон Кейнс.

- Дайнофф, М.Дж., Фрейзер, Л. и Тейлор, Б.Дж. (1982) Со стороны зрения, опорно-двигательного аппарата и производительности различия между хорошими и плохими рабочими станциями VDT. *Материалы ежегодного собрания Общества прав человека и эргономики*. , 26(2), 144. Публикации Sage. Дэвис И. и Харви В. (2008) Нулевой уровень выбросов углерода: что это значит для домовладельцев и Домостроителей? Отчет Фонда NHBC NF9, апрель 2008 г.
- Уважаемый Р., Акимото, Т., Аренс, Э. *et al.* (2013) Прогресс в исследованиях теплового комфорта за последние двадцать лет. *Воздух в помещении*. doi: 10.1111/ina.12046.
- Дехгани, Р., Асади, М.А., Чарклоо, Э. *et al.* (2012) Идентификация грибковых сообществ-связи при производстве компоста методом валкования. *Журнал по охране окружающей среды*., 3, 61-67.
- ДеКостер Дж.А. и Торн П.С. (1995) Концентрации биоаэрозоля в несоответствующем, сом-дома жалоб и вмешательства на Среднем Западе. *Журнал Американской ассоциации промышленной гигиены* , 56, 576- 580. Димитропулу, С. (2011) Вентиляция в европейских жилищах: обзор. *Строительство и* , 47, 109-125. *Окружающая среда*
- Долман, Р. и Брукс, Д.Дж. (2011) Стратегия по определению управления объектами категории знаний в искусственной среде, в *Материалы 4-й Австралийской конференции по безопасности и разведке* (ред. Д.Дж. Брукс и К. Валли), Сесау -Безопасность Исследовательский центр, Школа компьютерных наук и безопасности, Университет Эдит Коун, Перт, Западная Австралия, стр. 58 - 67. Дуа, С.К. и Хопке, П.К. (1996) Гигроскопический рост различных аэрозолей в помещении. *Аэрозоль Наука и техника*, 24, 151 -160.
- Dutkiewicz, J., Cisar, E., Sroka, J. *et al.* (2011) Биологические агенты как профессиональные опасности-избранные вопросы. *Анналы сельскохозяйственной медицины и медицины окружающей среды: ААЕМ*, 18, 286.
- Фан, З.Х., Линой, П., Вешлер, С. *et al.* (2003) Реакции, инициируемые озоном, со смесями летучие органические соединения в имитируемых условиях внутри помещений. *Наука об окружающей среде и технологии*, 37, 1811-1821. Ферро А.Р., Копперуд Р.Дж. и Хильдеманн Л.М. (2004) Сильные стороны источников для внутренних работ. деятельность человека, приводящая к ресуспандированию твердых частиц. *Наука об окружающей среде и технология*, 38, 1759-1764. Финлейсон-Питтс, Б.Дж. и Питтс, Дж.Н. (2000) *Химия верхних и нижних слоев атмосферы*, Академическая пресса.
- Фушье, Р.А.М., Гарсия-Састре, А. и Каваока, Ю. (2012) Приостановите передачу птичьего гриппа-исследования. *Природа*. doi: 10.1038/481443a.
- Гиббс, С.Г., Грин, К.Ф., Таруотер, П.М. *et al.* (2006) Выделение устойчивого к антибиотикам бактерия от струи воздуха с подветренной стороны при производстве замкнутого или концентрированного кормления свиней . *Перспективы охраны окружающей среды*, Голдастех И., Ахмади Г. и Ферро А. (2012а) Модель для удаления компактных, шероховатых, частицы неправильной формы с поверхностей в турбулентных потоках. *Журнал адгезии*., 88, 766-786. Голдастех И., Ахмади Г. и Ферро А. Р. (2012б) Исследование в аэродинамической трубе и численное моделирование-регулирование ресуспандирования частиц пыли с поверхностей внутри помещений в турбулентных потоках. *Журнал Наука и технология адгезии*.. doi: 10.1080/01694243.2012.747729.
- Гомес С., Фрейхаут Дж. и Банфлет В. (2007) Ресуспандия аллергена, содержащего частицы, подвергающиеся механическим и аэродинамическим воздействиям в результате ходьбы человека. *Атмосферическая среда*, 41, 5257-5270.

- Хамдани С. Е., Лимам К., Абади М.О. и Бенду А. (2008) Нанесение мелких частиц на внутренние поверхности зданий. *Атмосферная среда*, **42**, 8893- 8901.
- Он, К., Моравска, Л. и Гилберт, Д. (2005) Скорость осаждения частиц в жилых домах. *Атмосферная среда*, **39**, 3891 -3899.
- Агентство по охране здоровья (2012) *Последствия изменения климата для здоровья в Великобритании, 2012: Текущий-предоставьте доказательства, рекомендации*, Агентство по охране здоровья Великобритании, и пробелы в исследованиях Лондон.
- Хемфала, Х. и Эклунд, Дж. (2012) Визуальное эргономическое вмешательство в сортировку почты, облегчающее-аэрозоли: влияние на глаза, мышцы и производительность. *Прикладная эргономика*, **43**, 217-229.
- Хинде, У.К. (2005) Свойства аэрозоля, в книге *Справочник по аэрозолям, измерение, дозиметрия и последствия* (ред. Рузер Л.С. и Харли Н.Х.), CRC Press, Бока-Ратон, Флорида, стр. для здоровья 19- 33.
- Хобдей, Р. (2010) *Проектирование домов для здоровья - Обзор* По заказу компании VELUX Ltd.
- Хуссейн Т., Глицос Т., Ондрачек Дж. *et al.* (2006) Характеристика размера частиц и эмиссия-уровни загрязнения во время занятий в помещении в доме. *Атмосферное окружение*, **40**, 4285-4307.
- Хусейн Т., Груска А., Доханьосова П. *et al.* (2009) Скорость осаждения на гладких поверхностях и коагуляция аэрозольных частиц внутри испытательной камеры. *Атмосферное окружение*, **43**, 905- 914.
- Ибрагим, н. а., Данн П. Ф. и синий, Р. М. (2003) отряд микрочастицы с поверхности воздействию турбулентного потока воздуха: контролируемые эксперименты и моделирование. *Научный журнал по аэрозолям*, **34**, 765-782.
- Ибрагим А.Х., Данн П.Ф. и Брач Р.М. (2004) Эксперименты и валидация модели для отрыва микрочастиц от поверхности турбулентным потоком воздуха. *Журнал аэрозолей Наука*, **35**, 805-821. MOM (2011) *Изменение климата, окружающая среда внутри помещений и здоровье*, The National Academies Press, Вашингтон, округ Колумбия.
- МГЭИК (Межправительственная группа экспертов по изменению климата) (2007) *Изменение климата, 2007: Воздействия, адаптация и уязвимость*, МГЭИК, Женева.
- Джеймисон И.А., Холдсток П., Апсимон Х.М. и Белл Дж. необходимость электромагнитной гигиены? *Серия конференций ИОР: Наука о Земле и окружающей среде*, **10**(1), 012007. Джеймисон И.А., Джеймисон С.С., Апсимон Х.М. и Белл Дж.Н.Б. (2011) Обоснование и здоровье человека - обзор. *Журнал физики: серия конференций*, **301**(1), 012024.
- Джамриска М., Моравска Л. и Энсор Д.С. (2003) Стратегии контроля субмикрометрических частиц частицы в помещении: модельное исследование фильтрации и вентиляции воздуха. *Воздух в помещении*, **13**, 96 -105. Кассаб, С. А., угас, В. М., Король М. Д. и Хасан, Ю. А. (2013) высокое разрешение исследование микрометр отряд частиц на различных поверхностях. *Наука и технология в области аэрозолей*, **47**, 351-360. Ка-Вай Хуэй, Э. (2006) Причины увеличения числа возникающих и рецидивирующих вирусных инфекций-опасные заболевания. *Микробы и инфекция*, **8**, 905- 916.
- Келли, С.Т. и Гилберт, Дж.А. (2013) Изучают микробиологию внутренней среды. *Биология генома*, **14**, 1-9.
- Кембел, С.В., Джонс, Э., Клайн, Дж. *et al.* (2012) Архитектурный дизайн влияет на разнообразие и структуру микробиома окружающей среды. *Журнал ISME*, **6**, 1469-1479.

- Корженевская, Э. (2011) Выброс бактерий и грибов в воздух очистными сооружениями сточных вод- обзор. *Рубежи в бионауке*, **3**, 393.
- Куадио, И.К., Альджунид, С., Камигаки, Т. *et al.* (2012) Инфекционные заболевания после стихийных бедствий стихийные бедствия: меры профилактики и контроля. *Экспертный обзор противинфекционной терапии*, **10**, 95 - 104.
- Лай, А.К.К. (2002) Осаждение частиц в помещении: обзор. *Воздух в помещении*, **12**, 211-214. Лай, А.К.К. (2006) Исследование электростатических сил, влияющих на осаждение частиц в испытательной камере- бет. *Внутренняя и искусственная среда*, **15**, 179-186.
- Лейн, Х.К., Ла Монтань, Дж. и Фаучи, А.С. (2001) Биотерроризм: явная и актуальная опасность- германия. *Природная медицина*, **7**, 1271- 1273.
- Лехтонен М., Репонен Т. и Невалайнен А. (1993) Повседневная деятельность и изменение концентрации грибковых спор в воздухе помещений. *Международное биологическое восстановление и Биодegradация*, **31**, 25-39. Леветин Э., Шонесси Р., Фишер Э. *et al.* (1995) Качество воздуха в помещениях школ: воздействие грибковых аллергенов. *Аэробология*, **11**, 27 - 34.
- Ли, Ю., Люннг, Г.М., Тан, Дж.В. (2007) Роль вентиляции в передаче инфекции воздушно-капельным путем *et al* инфекционных агентов в искусственной среде - междисциплинарный систематический обзор. *Воздух в помещении*, **17**, 2 - 18. Лок К.С. (2012) Проектирование ЭМС в искусственной среде, в книге *Электромагнитная совместимость (АРЕМС), Азиатско-Тихоокеанский симпозиум 2012 г.*, IEEE, стр. 21 -24.
- Левенберг С. (2012) Индия сообщает о случаях туберкулеза с полной лекарственной устойчивостью. *В Ланцет*, **379** (9812), 205.
- Lunden, M.M., Revzan, K.L., Fischer, M.L. *et al.* (2003) Трансформация наружного воздуха аэрозоли нитрата аммония в помещении. *Атмосферная среда*, **37**, 5633-5644. Мастон, Н.Э. и Шерман, М.Х. (2004) Почему мы проветриваем наши дома -исторический взгляд, в *Летнее исследование АСЕЕЕ по энергоэффективности зданий*, Том. ⁷ Американский совет по энергоэффективной экономике, Вашингтон, Округ Колумбия, Пасифик-Гроув, Калифорния, стр. 241-250. Менделл М. и Файн Л. (1994) Вентиляция зданий и симптомы - куда нам идти отсюда? *Американский журнал общественного здравоохранения*, **84**, 346.
- Моравска, Л. (2004) Частицы, продукты сгорания и волокна внутри помещений, в *Справочнике химии окружающей среды. Часть F Загрязнение воздуха в помещениях*, Vol. **4** (эд Плуске П.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 117 - 147.
- Моравска Л., Афшари А., Бэй Г. *et al.* (2013) Аэрозоли для помещений: от личного воздействия до оценки риска. *Воздух в помещении*. doi: 10.1111 / ina.12044.
- Моравска Л. и Солтхаммер Т. (2003) Основные свойства частиц внутри помещений и осевшей пыли в *Помещениях* (ред. Л. Моравска и Т. Солтхаммер), Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Вайнхайм, стр. 3-46. Моренс, Д.М. и Фаучи, А.С. (2007) Пандемия гриппа 1918 года: выводы на 21-й столетие. *Журнал инфекционных болезней*, **195**, 1018.
- Мори, П.Р. (2010) Изменение климата и потенциальное воздействие на микробиологическое качество воздуха в искусственной среде, предварительный проект 2010 г., http://www.epa.gov/iaq/pdfs/climate_and_microbial_iaq.pdf (последнее обращение 9 августа 2013 г.). Мукаи С., Сигел Дж.А. и Новоселац А. (2009) Влияние характеристик воздушного потока на частицы- ресуспендирование частиц с поверхностей внутри помещений. *Наука и технология в области аэрозолей*, **43**, 1-11.

- Мюллер против (2012) Призыв к осторожности: огромные риски, связанные с лабораторно выведенным гриппом. *Вирусы*, **4**, 276 - 279.
- Назарофф, В.В. (2004) Динамика частиц в помещении. *Воздух в помещении*, **14**(Дополнение 7), 175-183.
- Назарофф, В.В. (2013) Изучение последствий изменения климата для качества воздуха в помещениях. *Письма об экологических исследованиях*, **8**, 015022.
- Пальмгрен, Х. (2009) Менингококковая инфекция и климат. *Глобальные действия в области здравоохранения*, **2**. doi: 10.3402/gha.v2i0.2061.
- Pasanen, A.L., Kalliokoski, P., Pasanen, P. *et al.* (1989) Грибы, переносимые с работы фермерами в фермерские дома. *Журнал Американской ассоциации промышленной гигиены*, **50**, 631-633.
- Цянь Дж. и Ферро А. (2008) Ресуспендирование частиц пыли в камере и связанные с этим факторы окружающей среды. *Наука и технология аэрозолей*, **42**, 566- 578.
- Рен П., Янкун Т.М., Беланжер К. *et al.*(2001) Связь между грибными популяциями в воздухе помещений и характеристиках дома. *Аллергия*, **56**, 419 - 424.
- Робертсон, К.Э., Баумгартнер, Л.К., Харрис, Дж.К. *et al* . (2013) Независимый от культуры анализ аэрозольной микробиологии в столичной системе метро. *Прикладная и экологическая микробиология*. doi: 10.1128 / AEM.00331-13.
- Руф, К. и Олеру, Н. (2008) Общественное здравоохранение: стремление Сиэтла и округа Кинг к построенному Окружающая среда. *Журнал охраны окружающей среды*, **71**, 24 - 27.
- Саригианнис, Д.А., Каракициос, С.П., Готти, А. *et al.* (2011) Подверженность основным летучим органическим соединениям и карбонилам в европейских помещениях и связанные с ними риски для здоровья. *Environment International*, **37**, 743-765.
- Сарвар Г., Корси Р., Аллен Д. и Вешлер С. (2003) Значение вторичных образование и рост органических аэрозолей в зданиях: экспериментальные и расчетные данные. *Атмосферная среда*, **37**, 1365 -1381.
- Сайнфельд Дж. Х. и Пандис С.Н. (2006) *Химия и физика атмосферы, от загрязнения воздуха-от загрязнения до изменения климата*, 2-е издание, John Wiley & Sons, Inc.
- Шонесси Р. и Ву Х. (2012) Нагрузки частицами и ресуспендирование, связанные с покрытием пола.- эрекции в камере и в занятой школьной среде. *Атмосферное окружение*, **55**, 515-524.
- Смит, М.Дж. и Байе, А.Д. (2003) Повышают ли улучшения эргономики компьютерную производительность работников?: интервенционное исследование в колл-центре. *Эргономика*, **46**, 3-18.
- Смит Т.С. и Пирсон Н. (2011) Появление золотистого стафилококка ST398. *Трансмиссивные и зоонозные болезни*, **11**, 327- 339.
- Шпенглер, Дж.Д. (2012) Изменение климата, окружающая среда в помещениях и здоровье. *Воздух в помещениях*, **22**, 89- 95.
- Стэгт, С., Боури, А., Келси, А. и Крук, Б. (2010) Выбросы биоаэрозоля из отходов Компостирование и потенциал воздействия на работников. Исполнительный директор по охране труда и технике безопасности Отчет об исследовании 786, Лаборатория охраны труда и техники безопасности Харпур Хилл, Бакстон, стр. SK17 9JN.
- Свон Дж., Гилберт Э., Келси А. и Крук Б. (2003) Охрана труда и окружающая среда- воздействие биоаэрозолей из компостов и потенциальные последствия для здоровья - критический обзор опубликованных данных. Отчет НИУ ВШЭ RR130, HSE Books, Садбери.
- Тэтчер, Т.Л., Лай, А.К.К., Морено-Джексон, Р. *et al.* (2002) Эффекты отделки помещения- концентрации и скорость воздуха влияют на скорость осаждения частиц в помещении. *Атмосферная среда*, **36**, 1811- 1819.

- Тэтчер Т.Л. и Лейтон Д.В. (1995) Повторное суспендирование осаждения и проникновение паразитов в пределах резиденции. *Атмосферное окружение*, **29**, 1487- 1497.
- Тодорович, М.С. и Ким, Дж. Т. (2012) За пределами науки и искусства здорового телосложения- прогнозирование и проверка эффективности *ings daylighting dynamic control*. *Энергетика и здания*, **46**, 159-166. ДЭСВ ООН (2009) Тенденции Департамента Организации Объединенных Наций по экономическим и социальным вопросам в Численность международных мигрантов: пересмотр 2008 года, <http://esa.un.org/migration/index.asp?> (последнее обращение 9 августа 2012 года). Организация Объединенных Наций (2010) Департамент по экономическим и социальным вопросам, Отдел народонаселения.
- Перспективы мировой урбанизации: пересмотр 2009 года. Издание на компакт-диске - Данные в цифровой форме (POP / DB / WUP /Rev.2009), Организация Объединенных Наций, Нью-Йорк. Вейч Дж.А. и Галасиу А.Д. (2012) Физиологические и психологические эффекты об окнах, дневном свете и видах из дома: обзор и программа исследований.
- NRC- Исследовательский отчет IRC RR-325, Институт строительных исследований NRC, doi: <http://dx.doi.org/10.4224/20375039>. Уоллес, Л.А., Эммерих, С.Дж. и Ховард-Рид, С. (2004) Эффект центральных вентиляторов и установите фильтры для определения скорости осаждения ультрадисперсных частиц в жилом доме. *Атмосферная среда*, **38**, 405-413. Ваньеки И., Олсон С., Брассар П. *et al.* (2006) Жилища, скученность и туберкулез в Монреале. *Социальные науки и медицина*, **63**, 501 -511.
- Уотсон, Дж. Т., Гайер, М. и Коннолли, М.А. (2007) Эпидемии после стихийных бедствий. *Возникающие инфекционные заболевания*, **13**,1.
- Уэбб, А. Р. (2006) Рекомендации по освещению в застроенной среде: не визуальные эффекты света. *Энергия и здания*, **38**, 721 - 727.
- Вешлер, К.Дж. и Шилдс, Х.К. (2003) Эксперименты по изучению влияния воздухообмена скорости на вторичные органические аэрозоли, образующиеся в результате химии внутри помещений. *Атмосферная среда*, **37**, 5621-5631.
- ВОЗ (2004) Глобализация и инфекционные заболевания: обзор взаимосвязей, специальные разделы Темы № 3, Женева.
- ВОЗ (2006) Инфекционные заболевания после стихийных бедствий. Оценка рисков и Приоритетные мероприятия. Программа по борьбе с болезнями в чрезвычайных гуманитарных ситуациях Кластер инфекционных заболеваний, Всемирная организация здравоохранения, Женева. ВОЗ (2009) *Руководящие принципы ВОЗ по качеству воздуха в помещениях: сырость и плесень*, Которые Европейское региональное бюро ВОЗ, Копенгаген.
- ВОЗ (2010a) Глобальная борьба с туберкулезом, доклад ВОЗ за 2010 год, Женева. ВОЗ (2010b) ТУБЕРКУЛЕЗ с множественной и широкой лекарственной устойчивостью (М/ШЛУ-ТБ): глобальный анализ 2010 года. Отчет о эпиднадзоре и ответных мерах, Женева.
- Доклад ВОЗ (2011) о бремени эндемичных инфекций, связанных с оказанием медицинской помощи, во всем мире- Всемирная организация здравоохранения, Швейцария.
- Бу Ю.Л., Дэвидсон К.И. и Рассел А.Г. (1992) Контролируемые эксперименты в аэродинамической трубе- отскок частиц и ресуспендирование. *Наука и технология аэрозолей*, **17**, 245-262. Xing, J.Y. (2012) Влияние электромагнитного излучения на опасность для здоровья человека и защитные меры- в современном обществе. *Передовые исследования материалов*, **518**, 1022-1026.

Ю, И.Т.С., Ли, Ю., Вонг, Т.В. *et al.* (2004) Свидетельства передачи инфекции воздушно-капельным путем вирус тяжелого острого респираторного синдрома. *Медицинский журнал Новой Англии.*, **350**(17), 1731-1739.

Юсуф С., Пьедимонте Г., Ауайс А. *et al.* (2007) Взаимосвязь метеорологических условий с эпидемической активностью респираторно-синцитиального вируса. *Эпидемиология и инфекция*, **135**, 1077 - 1090.

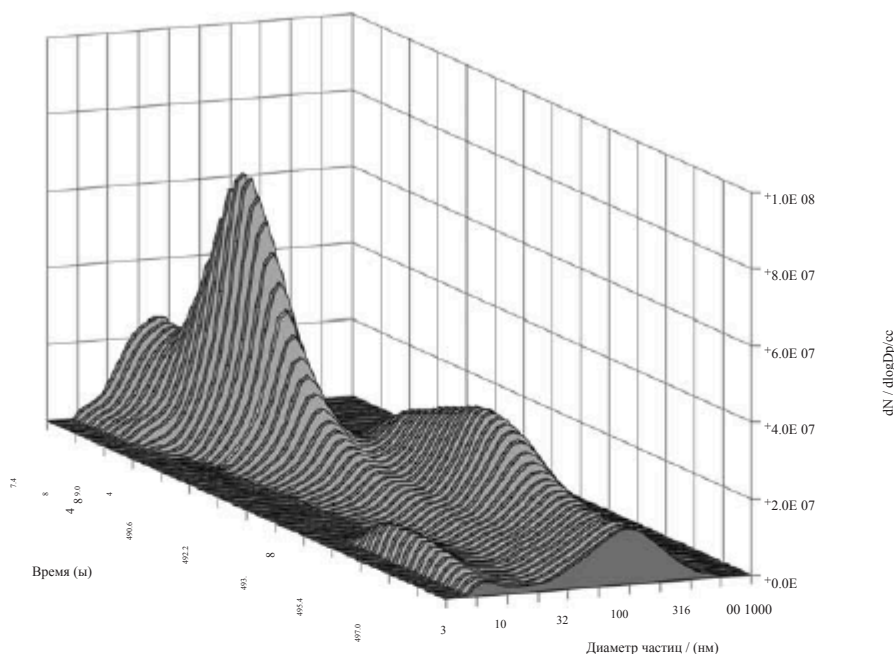
Выбросы твердых частиц транспортными средствами

Джонатан Симондс
Камбуз, Великобритания

15.1 Введение

Аэрозоли из двигателей транспортных средств образуются из пяти источников: топлива, присадок к топливу, поступающего воздуха, смазочного масла и механического разрушения ранее существовавших материалов. Последние также могут образовываться в автомобиле из других источников (например, тормозной пыли). Аэрозоли, образующиеся в двигателе, бывают четырех основных типов: углеродистые, органические, сульфатные и золовые. Обычно они образуются в комбинации. Топливо и масло входят во все четыре фракции; присадки к топливу, воздух и механическое разрушение вносят свой вклад в золую фракцию. Типичный аэрозоль от мощного дизельного двигателя состоит из 41% углерода, 13% золы, 14% сульфата / воды, 25% несгоревшего масла и 7% несгоревшего топлива (Киттельсон, 1998).

Основанный на количестве спектр размеров (рис. 15.1) аэрозоля для двигателя обычно включает некоторые из по меньшей мере трех различных логарифмически нормальных режимов (Киттельсон, 1998). Гомогенное зарождение летучих веществ в выхлопных газах (или частиц золы) может привести к так называемому режиму *зарождения*, размер которого обычно меньше 30 нм, с небольшим отклонением от геометрического стандарта. (<1.5). После этого наступает режим *накопления*, который обычно составляет от 60 до 200 нм, с общим стандартным отклонением (GSD) от 1,5 до 2,0. Именно здесь обычно обнаруживаются углеродистые ("сажевые") частицы агломерата. Частицы большего размера, чем это значение называются *грубым режимом* и состоят в основном из материалов, образующихся вне двигателя, таких как тормозная пыль и повторно поступающая сажа со стенок выхлопной системы. С точки зрения количества частиц, частицы режима зарождения и накопления значительно доминируют, но при взвешивании по массе крупнозернистый режим может составлять около 20% от общей массы твердых частиц.



Типичный спектр размеров частиц дизельного топлива для тяжелых условий эксплуатации, показывающий образование зародышей и их рост в режиме регулирования, возникающие во время переходного процесса. Данные предоставлены Университетом Западной Вирджинии.

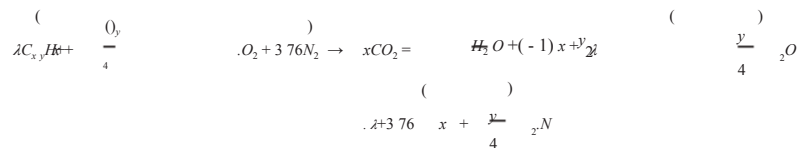
15.2 Концепции и технологии двигателей

15.2.1 Топливовоздушная смесь

Как мы увидим, одним из наиболее важных параметров, влияющих на образование частиц во время сгорания, является соотношение воздуха и топлива (AFR; например, Heywood, 1988, раздел 3.3). Это выражается в терминах *массовой* доли воздуха в топливе. Если присутствует ровно столько воздуха, чтобы сжечь все имеющееся топливо, то смесь называется *стехиометрической*. Если топлива слишком много по сравнению с воздухом, это называется *богатой* смесью, тогда как если топлива слишком мало, это называется *нежирная* смесь. Отношение общего AFR к стехиометрическому AFR представлено формулой .

Следовательно, для богатых смесей, $\lambda < 1$, а также для бедных смесей, $\lambda > 1$.

"Идеальное" сгорание стехиометрической или обедненной смеси кислорода и простого гидро- углеродного топлива может быть представлено в виде:



Если сжигается богатая смесь, то недостаток кислорода приводит, в первую очередь, к образованию монооксида углерода, а затем к образованию углеродистой сажи. На самом деле во всех процессах сгорания в двигателе образуются небольшие, но конечные количества CO, NO, NO негоревшего топлива (uHC) и твердых частиц (PM).

Из-за коротких временных интервалов, связанных с сгоранием, по сравнению с испарением топлива и смешиванием паров топлива и воздуха, локализованный AFR в отдельных частях цилиндра может сильно отличаться от общего AFR. В зависимости от способа подачи топлива и

попадание воздуха в цилиндр, локально насыщенные участки могут привести к образованию сажи (Гривз и Ван, 1982).

Если полностью испаренное топливо и воздух хорошо перемешаны, сгорание происходит посредством *предварительно смешанного пламени* (например, обычное горение в бензиновом двигателе). Если, однако, процесс горения идет преобладают скорость, при которой топливо и воздух смешиваются, то горение будет идти по пути *в распространение пламени* (например, типичное сгорание в дизельном двигателе).

15.2.2 Двигатели с искровым зажиганием

Двигатель с искровым зажиганием (SI) использует электрический разряд для воспламенения топливовоздушной смеси. Двигатели SI обычно работают на бензине, хотя все чаще вместо него используется сжиженный нефтяной газ (LPG), сжатый природный газ (CNG), этанол, биоэтанол или другое биотопливо, часто смешиваемое с бензином. Топливо и воздух могут быть предварительно смешаны во впускной системе двигателя, как в карбюраторных двигателях или двигателях с прямым впрыском топлива (PFI), или топливо может смешиваться с воздухом в цилиндре после впрыска непосредственно в него. Двигатели SI используют либо четырехтактный (впуск, сжатие, мощность, выхлоп), либо двухтактный (впуск -сжатие, мощность -выхлоп) рабочий цикл.

Система управления двигателем в двигателе PFI будет пытаться (при управлении по замкнутому контуру) поддерживать смесь на уровне, близком к стехиометрическому, что для бензина означает AFR приблизительно 14,5. Хотя значительно лучшая экономия топлива достигается при использовании слегка обедненных смесей, одновременное окисление CO и uHCs и уменьшение содержания NO требует использования как стехиометрической смеси, так и "трехстороннего" катализатора. Замкнутый контур управления заправкой для достижения стехиометрии достигается за счет использования датчиков содержания кислорода в выхлопных газах. Стехиометрические условия и хорошая смесь топлива и воздуха в бензиновых двигателях PFI также означают, что выбросы углеродистых частиц из топлива в этих двигателях невелики.

В последние годы возросла популярность бензиновых двигателей с непосредственным впрыском топлива (GDI). В них бензин впрыскивается непосредственно в цилиндр, а не во впускное отверстие. Этот метод заправки топливом имеет ряд преимуществ. В двигателе PFI поток через впускной клапан состоит из воздуха и паров топлива. При полном испарении примерно 5% по объему потока составляют пары топлива, что на 5% сокращает поступление воздуха в двигатель и на 5% снижает максимальную мощность. Кроме того, когда топливо испаряется в цилиндре, наполнитель цилиндра холоднее, чем когда испарение происходит в отверстии. Это позволяет двигателю работать с более высокой степенью сжатия и, следовательно, с более высоким КПД. Наконец, есть преимущества, связанные с улучшенным контролем AFR, поскольку в двигателе PFI некоторая часть топлива, поступающего в цилиндр, является результатом предыдущих впрысков, при которых оно оседало на стенке коллектора.

В стехиометрическом двигателе GDI топливо обычно впрыскивается сразу после закрытия выпускного клапана, что максимально увеличивает время, доступное для смешивания. Некоторые двигатели GDI работают, на протяжении части рабочего диапазона, в *стратифицированном режиме*, и топливо впрыскивается на последних стадиях сжатия. В принципе, это позволяет части цилиндра

содержать легковоспламеняющуюся смесь в области свечи зажигания, окруженной воздухом. Если бы такой режим был "идеальным", двигатель мог бы работать без дро в цилиндре приводят к значительному перемешиванию, и стратифицированное сгорание не получило широкого распространения.

Как правило, двигатели GDI страдают от более высоких выбросов ТЧ, чем двигатели PFI (например, цена *et al.*, 2006). Это связано с их пониженной однородностью воздуха и топлива и соударением топлива с поверхностями поршня и цилиндра. Эти более высокие выбросы приводят к образованию скоплений жидкого топлива, которые в конечном итоге сгорают путем диффузии, что снова приводит к увеличению выбросов углеродистой сажи (Витце и Грин, 2005).

Двигатели GDI становятся все более распространенными из-за их повышенной эффективности и сниженного содержания CO₂ выбросы, особенно в США и Японии, где малотоннажные дизельные автомобили, обладающие аналогичными преимуществами, не получили такого широкого распространения, как в Европе. Однако увеличение выбросов твердых частиц является недостатком, и регулирование и сокращение этих выбросов в настоящее время является областью интенсивных исследований.

15.2.3 Двигатели с воспламенением от сжатия

Двигатели с воспламенением от сжатия (CI) обычно называют "дизельными двигателями" в честь изобретателя Рудольфа Дизеля. Дизельные двигатели обладают высокой тепловой эффективностью благодаря их высокой степени сжатия (примерно от 15: 1 до 22 : 1). Степень сжатия бензиновых двигателей ограничивается началом "детонации", то есть самовоспламенением части смеси в конце процесса горения. В большинстве дизельных двигателей топливо впрыскивается непосредственно в чашу, образованную в поршне, ближе к концу такта сжатия. Затем в смеси, образующейся при испарении топлива и воздуха, происходит самопроизвольное воспламенение из-за температуры, возникающей во время такта сжатия (дизельное топливо разработано таким образом, чтобы иметь низкую температуру самовоспламенения по сравнению с бензином). Хотя использование все более высоких давлений впрыска приводит к улучшению смешивания топлива и воздуха, интенсивное горение неизбежно происходит в шлейфе паров топлива при смешивании с воздухом. В зависимости от угла поворота коленчатого вала и расположения внутри цилиндра, существуют значительные значения бесконечности, в отличие от бензинового двигателя PFI со стехиометрическим соотношением сторон, где ~~находятся в диапазоне 0,8~~ ^{везде равно} единице или почти так. Неизбежно образуется значительное количество ТЧ, и хотя большая их часть окисляется позже в процессе сгорания, значительные количества выходят через выпускные клапаны. Уровни выбросов углеродсодержащих частиц отдельными дизельными двигателями также намного выше, чем у отдельных двигателей GDI.

15.2.4 Двухтактные двигатели

Двухтактный двигатель завершает цикл сгорания за один оборот коленчатого вала. Двухтактные двигатели обычно используются в мотоциклах и садовом оборудовании, когда требуется высокая удельная мощность. В простейшем виде смесь воздуха, топлива и смазочного масла поступает в камеру сгорания через картер и отверстие в стенке цилиндра, соединяющее нижнюю и верхнюю стороны поршня. Когда поршень поднимается, отверстие закрывается; когда он достигает верха, происходит воспламенение от свечи зажигания. Когда поршень опускается, второе отверстие в стенке цилиндра открывается, и выхлопные газы выходят наружу. Уровни выбросов твердых частиц от двухтактных двигателей могут быть высокими из-за присутствия в смеси смазочного масла и короткого замыкания топливовоздушной смеси от впускного отверстия непосредственно к выпускному; действительно, часто образуется видимый дым. Короткое замыкание топлива может быть уменьшено с помощью современной технологии непосредственного впрыска. Спектр размеров частиц двухтактных двигателей может содержать некоторые довольно крупные частицы (от 500 до 1000 нм), которые, как считается, представляют собой конденсированную смазку масла, в дополнение к режимам образования зародышей и накопления (Стрелки *et al.*, 2010). Двухтактные скутеры особенно популярны в странах с развивающейся экономикой, и выбросы твердых частиц от них в настоящее время не регулируются.

15.2.5 Газотурбинные двигатели

Частицы, выбрасываемые реактивными двигателями, вызывают особую озабоченность, поскольку они выбрасываются непосредственно в верхние слои атмосферы и нижние слои тропосферы, где они могут непосредственно влиять на изменение климата (Fortuin *et al.*, 1995). Частицы сажи, образующиеся в этих двигателях, как правило, меньше, чем частицы, образующиеся в дизельных двигателях, обычно менее 60 нм (Petzold *et al.*, 2011), и первичные сферические частицы сажи часто обнаруживаются непосредственно в их неагломерированной форме (Schmid *et al.*, 2011). Помимо углеродистой сажи, также видны органические вещества и гидратированный сульфат, которые образуют зародышевые аэрозоли в следе двигателя. Наземные газовые турбины (для выработки электроэнергии, силовых установок и т.д.) Также производят ТЧ. В отличие от поршневых двигателей, фильтрация частиц на этих устройствах практически невозможна.

15.3 Образование частиц

15.3.1 Формирование в цилиндре

В процессе горения молекулы углеводородного топлива, каждая из которых содержит всего несколько атомов углерода, превращаются в частицы сажи, которые содержат многие тысячи атомов углерода (рис. 15.2). Первоначальная сложная и разнообразная совокупность реакций, происходящих при сгорании топлива с ограниченным количеством кислорода, известна как пиролиз. На первом этапе происходит образование молекул полиароматических углеводородов (ПАУ) из молекул топливных углеводородов (например, Иствуд, 2008, глава 3). Эти молекулы ПАУ, первоначально находящиеся в виде пара, затем подвергаются процессу зародышеобразования с образованием частиц-ядер размером менее 3 нм. Эти зародыши частиц затем растут за счет добавления углерода до тех пор, пока *не появятся первичные* частицы сажи размером от 20 до 50 нм. Электронная микроскопия показывает, что эти первичные частицы являются сферическими. Затем первичные частицы агрегируются вместе, образуя фрактальные частицы агломерата сажи. Во время всех этих процессов конкурирующий процесс окисления удаляет углерод, и конечные уровни углерода в такой же степени зависят от этого процесса удаления, как и от творческих процессов (Пипхо, Амбс и Киттельсон, 1986).

На начальной стадии сжигания предварительно смешанного жидкого топлива струя жидкого топлива начинает испаряться на кончике в результате уноса воздуха (декабрь 1997 г.). Затем происходит воспламенение топливовоздушной смеси в конце струи, и процессы пиролиза запускают превращение топлива в ПАУ. Горячая зарождающаяся сажа сначала появляется в очагах, а затем распространяется к краю шлейфа. Частицы сажи, окруженные оболочкой пламени на краю столба, быстро растут по сравнению с частицами внутри столба. Затем процесс переходит в стадию контролируемого сгорания со смешиванием до окончания процесса впрыска. Топливо частично сгорает на кончике топливной форсунки,

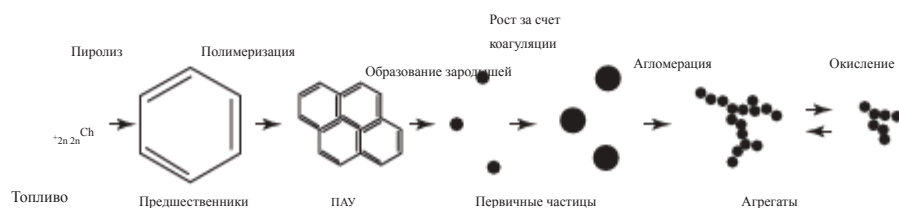


Рисунок 15.2

Образование сажи.

и продукты частичного сгорания направляются к кончику струи, где они попадают в диффузионное пламя. Процесс образования сажи начинается в пламени предварительной смеси, и предшественники сажи растут по мере продвижения к головке факела, где затем происходит некоторое окисление в диффузионном пламени. После прекращения впрыска топлива шлейф разрушается. Качество форсунки при падении давления топлива может ухудшиться, что на мгновение увеличит количество сажи перед окончанием сгорания.

Зольная фракция образуется из неорганических молекул, присутствующих в топливе, масле или присадках к топливу, а также небольшого количества, уносимого механическим износом двигателя. Может присутствовать определенное количество пыли, находящейся в воздухе, хотя фильтр забора воздуха должен ограничивать это. Обычными составляющими зольной фракции являются оксиды металлов, особенно оксиды кальция, магния и цинка, которые образуются из смазочного масла, и оксиды железа, которые образуются в результате коррозии материалов двигателя (Юнг, Киттельсон и Захария, 2003). Поскольку масло попадает на периферию камеры сгорания через поршневые кольца или штоки клапанов, оно не подвергается таким интенсивным условиям горения, как топливо, и поэтому аэрозольные компоненты, образующиеся из масла, могут быть химически очень близки к веществам, содержащимся в исходном масле.

Добавки в топливо, предназначенные для улучшения работы двигателя (например, антидетонационный агент ферро- роцен) или для ускорения регенерации сажевого фильтра (DPF) дизельного топлива (например, церий; Раздел 15.6.3), могут образовывать частицы золы в выхлопных газах (но в последнем случае, поскольку DPF подходит, эти частицы золы удаляются перед выбросом в окружающую среду). Частицы золы, образующиеся из присадок к топливу, как правило, имеют тот же размер, что и "зародышеобразование"

режим; то есть 50 нм (Гидней *et al.*, 2010). В отличие от первичных частиц-предшественников агломератов сажи (которые имеют аналогичный размер), частицы золы не имеют тенденции к образованию более крупных агрегатов. Компоненты золы обладают низкой летучестью; следовательно, их превращение из газа в твердую фазу происходит при нагревании на ранних стадиях процессов образования и, безусловно, в камере сгорания, а не в выхлопной системе. Металлические присадки к топливу действительно могут оказывать сажеподавляющее действие (Howard and Kausch, 1980). Например, ионы, образующиеся при хемионизации добавок в углеводородном пламени, могут подавлять агломерацию сажи посредством взаимного электростатического отталкивания.

Органическая фракция обычно образуется в результате образования негоревших молекул топлива из локально богатых областей в цилиндре (например, позднее испарение топливных отложений на стенках цилиндра; Като *et al.*, 1997) или чрезмерно перемешанный заряд, который слишком слаб для поддержания горения. Соединения, присутствующие в аэрозольной фазе, могут быть по существу химически неизменными по сравнению с их формой в топливе, или же могут подвергаться некоторому химическому синтезу в камере сгорания. Некоторые из них могут быть молекулами-предшественниками сажи ПАУ, то есть молекулами, которые не эволюционировали до образования сажи (Fujiwara, Tosaka and Murayama, 1993). Достаточное количество негоревшего топлива может привести к образованию *белого дыма* в выхлопной трубе. Эти частицы, в отличие от наночастиц, образующихся при сгорании, достаточно велики, чтобы их можно было обнаружить оптически. Менее летучие углеводороды из смазочного масла, которые проходят мимо комплекта поршневых колец, являются еще одним источником органического аэрозоля; это особенно актуально в двухтактных двигателях, где всасываемый воздух и масло смешиваются.

Как правило, образование сажи увеличивается с увеличением нагрузки двигателя. Как отмечалось ранее, в дизельных двигателях более высокая нагрузка означает более насыщенное сгорание. Кроме того, высокая нагрузка приводит к более высоким температурам горения, а это значит, что процессы образования сажи полностью завершены. При более низких нагрузках процессы могут не завершиться, и аэрозоль двигателя будет состоять в основном из материалов, образующихся в процессе образования зародышей из органических соединений, промежуточных в саже

процесс формирования. Кроме того, при образовании сажи материал, который в противном случае мог бы образовать способ образования зародышей (включая сульфат), часто поглощается сажей, тем самым подавляя формирование способа образования зародышей (Абдул-Халек, Киттельсон и Брер, 2000). Это приводит к характерному (иногда взаимоисключающему) взаимодействию режимов образования зародышей и накопления в зависимости от нагрузки в течение установленного законом цикла движения или при реальном вождении при использовании быстродействующего анализатора частиц (например, Campbell *et al.*, 2006).

Органические и сернистые пары-предшественники частиц часто не попадают в фазу твердых частиц до тех пор, пока не достигнут выхлопных систем или даже воздуха, где происходит образование конденсата из-за охлаждения и разбавления.

15.3.2 Выделение в системах выхлопа и последующей обработки

Как твердые, так и летучие фракции аэрозоля выхлопных газов двигателя подвергаются дальнейшим процессам в системе выпуска. При высоких концентрациях частицы сажи, образующиеся в процессе накопления, подвергаются агломерации, увеличиваясь в среднем размере и уменьшаясь в количестве, но сохраняя ту же общую массу. По мере остывания аэрозоля частицы сажи могут адсорбировать летучие вещества, образуя покрытие. Органическая фракция может продолжать подвергаться химическим реакциям даже в выхлопных системах; например, ПАУ может продолжать реагировать при температуре до 250°C° (Уильямс, Перес и Гриффинг, 1985).

Сульфатный аэрозоль фракция состоит преимущественно из серной кислоты, а конденсация ядерного-вания аэрозоля (Абдул-Халек, Kittelson и Brear, 2000). Сера присутствует как в топливе, так и в смазочном масле, хотя на многих рынках ее содержание в топливе значительно снижено. В процессе горения сера окисляется с образованием в основном диоксида серы и небольшого количества триоксида серы. Серная кислота образуется в результате гидролиза SO₂, но поскольку ее присутствует мало в результате самого сгорания, основным источником кислоты является предварительное превращение SO₂ в SO₃, которое обычно происходит в системе последующей обработки: ³

2



Современные дизельные автомобили оснащены катализатором окисления дизельного топлива (DOC) в выхлопной системе для уменьшения выбросов CO, углеводородов и растворимых органических фракций (SOF). Однако документ также является основным источником преобразования SO₂ в SO₃. Использование ² дизельное топливо с низким содержанием серы снижает проблему образования сульфатов.

15.3.3 Источники негорючих частиц

Источниками частиц крупного помола являются: пыль с тормозных накладок, износ шин, дорожного покрытия износ двигателя и ржавчина, пыль и окалина из выхлопной системы и каталитической системы. Смазка маслом является еще одним источником негорючего аэрозоля, а также аэрозоля для горения. Пары из картера двигателя содержат мелкие частицы (включая "выброс", который выходит из камеры сгорания через комплект поршневых колец) и более крупные капли масла в масштабе многих микрон, независимо от того, запускается двигатель или даже просто вращается с помощью стартера (Johnson, Hargrave and Reid, 2011). В США и Европе пары картера должны либо удаляться с помощью закрытой системы вентиляции картера (CCV), либо отводиться в выхлопную систему (в этом случае общий объем выхлопных газов по-прежнему регулируется соответствующими предельными выбросами ТЧ).

15.3.4 Эволюция в окружающей среде

Образование зародышей органических и сульфатных фракций в аэрозольную фазу обычно происходит по мере того, как аэрозоль охлаждается в выхлопной системе или при разбавлении в конце выхлопной трубы. Когда выхлопные газы, наконец, достигают окружающей среды в конце выхлопной трубы, преобладают два эффекта: выхлопные газы быстро охлаждаются и снижается парциальное давление химических компонентов в газовой фазе. Охлаждающий эффект увеличивает степень насыщения, стимулируя зарождение частиц и рост, а разбавление снижает давление паров компонентов, подавляя зарождение и рост и, в конечном итоге, усадку и испарение летучих частиц (Абдул-Халеб, Киттельсон и Бреар, 2000). При добавлении небольшого количества разбавителя преобладает охлаждающий эффект (и, следовательно, зарождение и рост), но температура выхлопных газов быстро достигает температуры воздуха, поэтому добавление дополнительного разбавления сверх этого значения просто служит для снижения концентрации компонентов газовой фазы, что приводит к преобладанию усадки частиц и испарения.

В непосредственной близости от движущегося транспортного средства поток становится сложным, с преобладанием турбулентного перемешивания (Карпентьеры, Кумар и Робинс, 2011). На больших масштабах протяженности, дальше от транспортного средства, следы от транспортных средств взаимодействуют, и в распределении преобладает геометрия местности. Например, участки, образованные высокими зданиями по обе стороны дороги, как правило, способствуют накоплению большого количества ^{высоких концентраций} твердых частиц. В то время как частицы, способные к зарождению, могут продолжать мутировать, частицы, способные к накоплению, могут оставаться в течение месяца в концентрациях, присутствующих в атмосфере, при отсутствии дождей (Кумар *et al.*, 2010).

15.4 Влияние выбросов твердых частиц Транспортными средствами

15.4.1 Воздействие на здоровье и окружающую среду

Острое воздействие аэрозоля из дизельных двигателей вызывает раздражение (в глазах, горле и бронхах) и проблемы с дыханием (кашель, обострение астмы) (Агентство по охране окружающей среды США, 2002). Хронические эффекты включают вероятную канцерогенную активность (EPA США, 2002) и повышенный риск ^{et al} сердечных заболеваний (Miller, 2007). Тот факт, что пешеходы в городских условиях располагаются так близко к транспортным средствам и их выхлопным газам, и что низкая скорость городских транспортных средств создает меньшее разбавление в кильватерном следе, чем на высокой скорости, означает, что уровни воздействия на пешеходов могут легко превышать концентрации, которые могут вызвать последствия для здоровья (Баззард, Кларк и Гаффи, 2009). Более крупные частицы оседают в носу и верхних дыхательных путях, в то время как мельчайшие наночастицы могут достигать альвеолярной области и даже попадать в кровоток.

Черный углерод, включая моторную сажу, поглощает свет и, таким образом, действует как положительный радиационный фактор и способствует глобальному потеплению (Раманатан и Кармайкл, 2008).

15.4.2 Законодательство
В целях противодействия воздействию наночастиц машинного производства на здоровье человека и окружающую среду, в большинстве территорий введены своего рода ограничения на производимые уровни. В США действуют ограничения на частичную массу тела с 1990-х годов (для дизельных автомобилей) и в Европе с 2000 года (таблица 15.1). Ограничения различаются

для транспортных средств малой и тяжелой грузоподъемности, и существует ¹ Калифорния, как правило, имеет свой собственный набор стандартов выбросов, часто опережая остальные США.

Таблица 15.1 Европейские стандарты выбросов твердых частиц для легких условий эксплуатации.

Этап	Дата официального утверждения типа)	Дизельное топливо		Бензин с непосредственным впрыском	
		PM (мг/км)	PN (# /км)	PM (мг)	PN (#/км)
Евро 3 января 2000 г.		/км) 50 - -			-
Евро 4 января 2005 г.		25 - -			-
Евро 5a Сентябрь 2009 г.		5* -5*			-
Евро 5b Сентябрь 2011 г.		5* 6.0 10 ¹¹		×	
Евро 6 сентября 2014 г.		5* 6.0 × 10 ¹¹ 5*			6.0 × 10 ¹²
				(6.0* 10 ¹¹	с 2017 года)

4.5 мг / км при измерении по процедуре PMP.

Источник: www.dieselnet.com, последнее обращение 8 августа 2013 г.

существует множество специальных категорий, таких как стандарты транспортных средств с низким уровнем выбросов (LEV).

Метод, используемый для измерения массы твердых частиц, почти повсеместно использует фильтровальную бумагу; см. Раздел 15.5.2.

Транспортные средства, проходящие испытания на выбросы, настраиваются для мониторинга с помощью динамометра шасси ("дорога с накатом") и приводятся в движение по стандартному циклу. Они предписаны законодательством и включают ускорения, замедления, переключение передач и плавный переход на стационарный режим. В США широко распространен протокол FTP-75 (Федеральная процедура тестирования); поскольку он был основан на реальном приводе, он имеет нестандартный профиль скорости. В Европе для испытаний в условиях малой нагрузки используется NEDC (Новый европейский приводной цикл) . Его скоростной профиль гораздо более однороден и состоит из трех идентичных "городских" скоростных профилей, за которыми следует "внегородской" этап, включающий круизы со скоростью до 120 км / ч. Выбросы обычно выражаются в количестве твердых частиц на километр или милю. Тестирование обычно проводится с холодного пуска - условия, которые могут привести к увеличению выбросов твердых частиц в начале испытания. В настоящее время разрабатывается ряд согласованных во всем мире приводных циклов для использования в будущем законодательстве.

Поскольку стандарты выбросов становятся все более жесткими, метод фильтровальной бумаги стал несколько затруднительным для использования на практике. Масса, собранная во время теста, стала очень маленькой, и избежать воздействия артефактов стало трудно или, по крайней мере, очень дорого. Кроме того, те, кто изучает воздействие на здоровье, выразили некоторую озабоченность по поводу того, что измерение массы тела неадекватно соотносится с рисками для здоровья. В ответ на эту обеспокоенность Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных Наций (ЕЭК ООН) заказала исследование альтернативных методов измерения уровня твердых частиц для использования в будущем европейском законодательстве. Программа измерения частиц (PMP) провела экспериментальные исследования эффективности существующих методов и, предложив *твердый*-стандарт, основанный на количестве частиц (см. Раздел 15.5.3), провел корреляционные упражнения, чтобы продемонстрировать практичность, повторяемость, воспроизводимость и надежность метода (Андерссон *et al.* 2010). В отчете для легких условий эксплуатации было обнаружено, что количество выбросов частиц дизельными двигателями, оснащенными DPF, было меньше $2,0 \times 10^{11}$

/ км, с типичной

повторяемостью 30%. Выбросы обычных дизельных автомобилей составляли

около 10^{13} - 10^{14} # / км; то есть на 2 порядка выше, чем у автомобилей, оснащенных DPF.

Кроме того, количество выбросов твердых частиц у этих протестированных бензиновых

автомобилей с непосредственным впрыском составляло около 10^{13}

измерения количества твердых частиц в рамках этапов Евро 5/6 законодательства о проверке

выбросов в Европе. Лимит для дизельных малотоннажных автомобилей был установлен в размере

/ км, и в 2011 году было предложено, чтобы это также относилось к прямому впрыску $6,0 \times 10^{11}$ автомобилей, работающие на бензине, с 2017 года, с временным ограничением, на порядок превышающим то, которое вводится с 2014 года (таблица 15.1).

15.5 Методы отбора проб и измерений

15.5.1 Обработка образцов

Метод, с помощью которого отбирается проба аэрозоля двигателя и транспортируется в анализатор, является наиболее важным фактором, определяющим качество последующего измерения. Обычно необходимо разбавить и / или охладить пробу аэрозоля двигателя перед измерением из-за ограничений на концентрацию и температуру, установленных используемыми приборами. Однако разбавление и охлаждение неизбежно изменяют природу аэрозоля (Luukkainen *et al.*, 2004). Как и в случае с реальным разбавлением, которое происходит внутри и снаружи выхлопной системы автомобиля, разбавление и охлаждение, необходимые для измерения, будут влиять на фракцию летучих частиц. Охлаждение с небольшим разбавлением или без него приведет к большой степени образования зародышей и уплотнения - материал из газовой фазы перейдет в аэрозольную фазу и затем будет измерен. Если используется достаточное разбавление, парциальное давление летучего материала в газовой фазе будет снижено, тем самым предотвращая перенасыщение и конденсацию в фазу частиц. Этот процесс может быть дополнительно ускорен с помощью горячего разведения (Каваи, Гото и Одака, 2004). Это сводится к вопросу о том, что необходимо измерить: репрезентативный образец аэрозоля, какой можно было бы найти в реальной среде, или (принимая во внимание, что это зависит от такого количества переменных и условий, что является почти субъективным) измерение гораздо менее изменчивой твердой фракции.

В качестве альтернативы дополнительному разбавлению при желании можно использовать термодеструктор для удаления летучих веществ. Он состоит из горячей трубки, которая обеспечивает присутствие летучих веществ только в газовой фазе, и области, заполненной активированным углем, который затем поглощает летучие вещества, предотвращая последующее повторное образование ядер. Одним из преимуществ термодеструктора является то, что он не требует дополнительного разбавления, что позволяет использовать менее чувствительный прибор. Использование *каталитический очиститель* (Киттельсон *et al.*, 2004) является другим альтернативным способом удаления летучих веществ. Как в термоденудерах, так и в каталитических очистителях наблюдаются некоторые потери твердых частиц из-за диффузии.

Наиболее распространенным оперативным методом отбора проб из выхлопной трубы является пробоотборник постоянного объема (CVS; например, Burtcher, 2005). В своей простейшей форме это труба большого диаметра, на одном конце которой установлена выхлопная труба, а на другом - вентилятор, обеспечивающий постоянный объемный поток. Общий расход намного превышает максимальный расход выхлопных газов, и потребляемый дополнительный расход приводит к разбавлению выхлопных газов порядка 10:1. Уровень разбавления зависит от изменений расхода выхлопных газов, происходящих в течение цикла испытаний, но ключевым моментом системы CVS является простота расчета мгновенных уровней выбросов, будь то для частиц или для выбросов в газовой фазе. Независимо от фактических концентраций, которые образуются в выхлопных газах, поток частиц в системе CVS представляет собой концентрацию, измеренную в системе CVS (для частиц, скажем, в Н / куб.см), умноженную на объемный расход (куб. см / с, что дает Н / с). Затем легко интегрировать поток по времени, чтобы получить общее количество частиц (или массу), а затем разделить на расстояние, пройденное в ходе испытания, чтобы получить установленное законом количество в Н / км (или мг / км). Напротив, если образец непосредственно из выхлопной трубы, надо бы узнать потока в выхлопную трубу. Учитывая разрушительную природу

что касается веществ, присутствующих в потоке выхлопных газов, то обычно этот расход невозможно измерить непосредственно с помощью массового расходомера. Это можно определить по расходу воздуха, поступающего в двигатель, с добавлением учета израсходованного топлива, но это значительно сложнее и более подвержено ошибкам, чем использование системы CVS. Обычно желательно фильтровать чистый воздух, поступающий в систему CVS, особенно если он будет использоваться для отбора проб на транспортном средстве с относительно низким уровнем выбросов, оборудованном DPF.

Менее громоздкой и менее дорогой альтернативой системе CVS является резервуар для частичного разбавления потока. В таких туннелях отбирается определенная доля потока выхлопных газов, но для поддержания этого показателя требуются измерение потока выхлопных газов и система оперативного контроля.

Учитывая высокие температуры выхлопных газов и тот факт, что для большинства приборов требуется охлажденный образец, важно избегать термофоретических потерь, которые могут возникнуть при постепенном охлаждении образца. Поэтому обычно предпочтительнее охлаждать как можно быстрее, добавляя холодный воздух, а не позволяя образцу постепенно охлаждаться в трубке. Потеря частиц в результате диффузии может быть значительным источником ошибок, если используется достаточно узкая и длинная трубка. Также важно использовать электропроводящие трубки, чтобы избежать потери частиц при электрофорезе. Обычно это означает нержавеющую сталь, где это возможно, или специальные электропроводящие трубки из силикона или ПТФЭ, где требуется гибкость, хотя эти неметаллические материалы могут разрушаться и выделять частицы даже при умеренно высоких температурах.

Частицы, осевшие на стенках системы отбора проб и транспортировки, могут время от времени повторно увлекаться обратно в аэрозольную фазу. После повторного уноса эти частицы, как правило, становятся крупными, и их влияние можно уменьшить, используя циклон перед измерительной системой, чтобы удалять частицы большего размера, чем интересующий размер. Сообщалось, что определенные типы труб могут поглощать углеводороды из выхлопных газов, впоследствии высвобождая их непредсказуемым образом, создавая дополнительные частицы в режиме зарождения (Maricq *et al.*, 1999).

15.5.2 Измерение массы

Большинство законодательных актов, касающихся выбросов твердых частиц транспортными средствами, по-прежнему выражаются в единицах массы частиц, собранных на фильтровальной бумаге. После разбавления (например, с помощью системы CVS) известный массовый расход пробы пропускается через одну (или более) фильтровальную бумагу (часто запасной фильтр используется последовательно с основным фильтром для улавливания любого материала, который проходит через последний). Фильтры взвешиваются на чувствительных весах как до, так и после испытания, и за разницу берется общая масса твердых частиц - обычно порядка нескольких миллиграммов. Поскольку потоки в системе CVS и через фильтровальную бумагу известны, масштабирование массы фильтровальной бумаги для представления общей массы теста - это просто вопрос использования соотношения этих потоков в качестве масштабного коэффициента.

Вид адсорбируется на бумаге включают в себя не только твердые углеродистые и зола фракций, а также любые летучие материал, который конденсируется. Практически невозможно определить, находилось ли адсорбированное летучее вещество в аэрозольной фазе в реальных условиях, а существующие уровни очень зависят от разбавления и условий отбора проб. ,

По мере того, как транспортные средства становятся все более чистыми, и в частности с широким внедрением DPF, уровень массы, который необходимо измерять на фильтровальной бумаге, приближается к практическому пределу обнаружения для данного метода (Liu *et al.*, 2009). Для улучшения обнаруживаемости были использованы различные методы с использованием фильтровальной бумаги. Например, постановление 40 CFR 1066 Агентства по охране окружающей среды США (EPA) определяет меры по борьбе с плавучестью и электростатическим зарядом.

Различные оперативные методы измерения, используемые в автомобильной промышленности, дают прямое или косвенное измерение массы частиц. Непрозрачность (поглощение света) использовалась в течение многих лет в качестве суррогата массы частиц. Эти приборы работают либо непосредственно, проникая светом сквозь аэрозоль, либо косвенно, улавливая твердые частицы на фильтровальной бумаге и измеряя "черноту" бумаги. Первый метод перекрестно чувствителен к NO, который обычно присутствует в выхлопных газах дизеля. Второй метод более чувствителен, но

2

является псевдодискретным. Два других метода, колебательные микровесы с коническими элементами (ТЕОМ) и микровесы с кварцевыми кристаллами (QCM), оба собирают частицы на сборном устройстве и используют резонансную частоту для измерения имеющейся массы. Другим используемым устройством является фотоакустический датчик сажи (PASS), который использует источник света для облучения сажи и чувствительный микрофон для улавливания результирующего звука, который затем используется для определения массовой концентрации частиц.

Доступны приборы, использующие противоположные электрические и центробежные силы между центрированными вращающимися цилиндрами и прикладывающие напряжение для классификации заряженных аэрозольных частиц по их отношению массы к заряду, такие как масс-анализатор аэрозольных частиц (APM; Eha, Hagwood and Coakley, 1996) и центробежный масс-анализатор частиц (CPMA; Olfert and Collings, 2005). Они использовались в качестве первичных эталонов для измерения массовой концентрации частиц в двигателе, и сравнение с измерениями на фильтровальной бумаге показывает, что артефакт, возникающий в результате поглощения летучих веществ фильтровальной бумагой, может составлять 50% от общей массы фильтровальной бумаги (Park, Kittelson and McMurry, 2003). Термогравиметрический анализ (ТГА) часто используется для определения процентного содержания углеродистой сажи в образце.

Массовую концентрацию частиц также можно рассчитать, соответствующим образом взвесив данные прибора для определения размеров частиц, предполагая плотность и *фрактальную размерность* - см. Раздел 15.5.5.

15.5.3 Измерение количества твердых частиц

Измерение массы с помощью фильтровальной бумаги имеет несколько заметных ограничений (Liu *et al.*, 2009):

- По мере того как двигатели становятся все более чистыми, становится все труднее точно измерять образующуюся низкая масса сажи.
- На фильтровальную бумагу могут воздействовать артефакты, вызванные конденсированными летучими веществами, которые возможно, "обычно" находятся в газовой фазе, а не в фазе твердых частиц. Во многих случаях масса такого летучего материала может превышать количество сажи, образующейся в современном двигателе.
- Измерение массы по своей сути смещено в сторону присутствия более крупных частиц. Там

существует много доказательств того, что наночастицы меньшего размера оказывают большее вредное воздействие на здоровье, чем наночастицы большего размера; таким образом, ограничение массы частиц может не очень хорошо коррелировать с улучшением результатов для здоровья. Чтобы решить эти проблемы в Европейском союзе, а *количество твердых частиц* метод измерения был внедрен как раз к этапу стандартов выбросов Евро-6

(Andersson *et al.*, 2007; R83 ЕЭК ООН). Выполняется фактический подсчет количества частиц счетчиком частиц конденсата (CPC). Они более чем достаточно чувствительны для проведения этого измерения, обычно имея диапазон концентраций (при подсчете отдельных частиц

режима) между < 1 и 10 000 частиц на кубический сантиметр. При превышении этого диапазона CPC часто работают в фотометрическом режиме, где оценка количества частиц производится на основе объемного оптического рассеяния частицами, а не путем подсчета отдельных частиц; поэтому они

требуется эмпирическая калибровка. Верхний предел CPC в режиме подсчета обычно на несколько порядков меньше, чем концентрация твердых частиц в типичном дизельном транспортном средстве, и, следовательно, перед CPC требуется некоторая форма разбавления, если должен использоваться режим подсчета (в соответствии с требованиями).

Причина, по которой в методологии принято решение измерять только твердые частицы и, таким образом, исключать летучие частицы, заключается в том, что последние трудно измерить с какой-либо повторяемостью. Кроме того, было проведено мало медицинских исследований, подтверждающих, что существуют последствия для здоровья, связанные с летучими частицами - в отличие от твердых частиц, которые могут сохраняться в легких. Частицы в режиме нуклеации могут быть легко созданы из частиц в газовой фазе и разрушены - процессы, которые очень чувствительны к точным условиям окружающей среды, отбора проб и разбавления, используемым. Для проведения какого-либо значимого сравнения транспортных средств со стандартами, или для определения тенденций, вызванных техническими изменениями, очень важно, чтобы такие измерения были повторяемыми.

Ключом к удалению летучих частиц в системе являются системы разбавления выше по потоку от CPC (рисунок 15.3). Используются две стадии разбавления. Первый нагревает аэрозоль до 150°C и служит как для испарения существующих летучих частиц, так и для снижения частичного давления частиц газовой фазы, чтобы предотвратить их образование в виде частиц. За этой стадией следует испарительная трубка, где образец нагревается до 300°C в течение $\approx 0,2$ секунды для испарения любого другого полужидкого материала. После этой трубки вторая ступень дополнительно снижает парциальное давление газа, чтобы предотвратить повторное образование зародышей, а также быстро охлаждает образец (чтобы предотвратить термофоретические потери), что позволяет проводить измерения с помощью CPC.

Тип разбавителя, используемого для первой стадии, часто представляет собой разбавитель с вращающимся диском, который состоит из диска с рядом глухих или сквозных отверстий, параллельных оси вращения, в которые концентрированный аэрозоль осаждается потоком из источника отбора пробы. Когда диск вращается, через отверстия образец попадает в поток чистого воздуха, который затем удаляет частицы и разбавляет их. Достижимая степень разбавления зависит от скорости вращения - чем ниже скорость, тем выше разбавление. Альтернативные системы используют тщательное измерение расхода аэрозоля и контролируемое дозированное разбавление чистым воздухом. Обычно невозможно измерить поток, насыщенный частицами, с помощью обычных регуляторов массового расхода, поэтому часто используется перепад давления на диафрагменной пластине.

CPC, предназначенный для использования в системах данного типа, сконструирован путем изменения внутренней температуры сатуратора таким образом, чтобы d_{50} предельный размер 23 нм. Это делается для того, чтобы материал, работающий в режиме зародышеобразования, который не удаляется стадиями разбавления или испарительной трубкой, просто удалялся.

не учитывается CPC. Однако это спорно, поскольку не все частицы

< 23 нм можно назвать

летучими. Твердые частицы золи могут быть меньше этого размера, и, хотя они не являются летучими, они будут удалены к предельному значению CPC (Гидни, Твигг и Киттельсон, 2010).

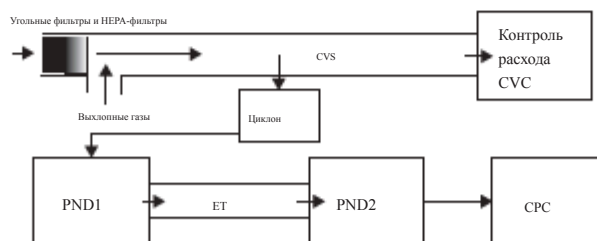


Схема измерения количества твердых частиц. PND, разбавитель количества частиц; ET, испарительная трубка; CPC, счетчик частиц конденсата; CVS, пробоотборник постоянного объема.

15.5.4 Методы определения размеров

Сканирующий измеритель подвижности частиц (SMPS) исторически был стандартным прибором, используемым для измерения распределения наночастиц по размерам. Однако при нормальном времени сканирования более 1 минуты он не подходит для быстро меняющихся источников аэрозоля, таких как двигатели, работающие не в установившемся режиме. Действительно, установленные законом циклы движения по своей природе являются временными.

Одним из первых инструментов, которые позволяют в режиме реального времени измерения размеров частиц и дистрибуции из двигателей был электрический низкого давления ударного элемента (ЭЛПИ; Ahlvik *et al.*, 1998). Он состоит из зарядного устройства и ряда ударных пластин. Когда частица приземляется на пластину, регистрируется ток и определяется аэродинамический диаметр. Хотя они не обладают таким высоким спектральным или временным разрешением, как устройства электрической мобильности, описанные ниже, диапазон измеряемых размеров частиц простирается от нескольких нанометров до 10 мкм, а использование ударных пластин позволяет отбирать образцы с разделением по размерам для автономного тестирования, например, с помощью химического анализа.

В последние годы стали доступны спектрометры быстрой подвижности частиц, которые, несмотря на снижение чувствительности и спектрального разрешения SMPS, обеспечивают гораздо более высокую скорость передачи данных (до 10 Гц) и, что более важно, короткое время отклика (до 200 мс). Эти спектрометры дифференциальной подвижности (Reavell, Hands and Collings, 2002; Johnson *et al.*, 2004) сначала заряжают аэрозоль с помощью униполярного диффузионного зарядного устройства, которое обеспечивает более высокий уровень заряда, чем биполярное зарядное устройство. Как следует из названия, заряд (обычно) является чистым положительным, а не чистым нейтральным распределением. Затем частицы поступают в классификационную колонку, которая похожа на дифференциальный анализатор подвижности (DMA) в том смысле, что в ней имеется центральный высоковольтный электрод (который здесь отталкивает положительно заряженные частицы) и воздушный поток оболочки, который переносит частицы к другому концу колонки. Частицы движутся в траекториях, что зависит от их заряда-коэффициент сопротивления, в конечном итоге посадка на серию металлических обнаружения кольца размещают вдоль внутренней стороны наружной стены классификации колонке. Каждый детектор подключен к чувствительной цепи электрометра, и при попадании частицы регистрируется небольшой ток (порядка нескольких фемтоампер). Алгоритм инверсии данных использует модель зарядки и модель классификатора для генерации спектральной плотности размера в зависимости от диаметра на основе измеренных токов. Данные на рисунке 15.1 были получены с помощью такого прибора.

15.5.5 Определение морфологии

Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) обычно используется для изучения структуры агрегатов сажи (рис. 15.4). Первичные частицы обычно четко различимы, и их

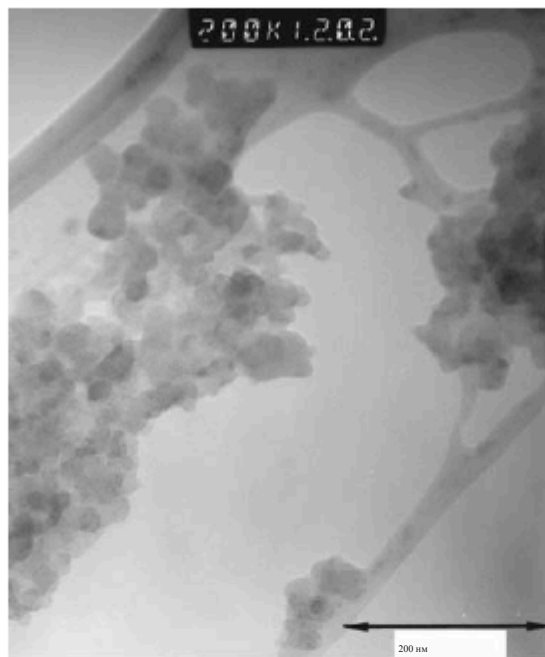
размер можно оценить; количество (N) в масштабе агломерата с радиусом вращения

(R_g) как:

R

$$N = k_g \frac{2R_g(D_p)^d}{r^d}$$

где D_p является *фрактальным измерением*, r является диаметром первичной частицы и k_g является константой (Мандельброт, 1982). Радиус вращения равен среднеквадратичному расстоянию первичных частиц от центра заполнителя. Для заполнителей сажи, D обычно чуть меньше, чем 2.0 (например, Park, Kittelson and McMurry, 2004).



ТЕМ тяжелых агрегатов дизельного топлива и сажи; отчетливо видны первичные частицы. **Рисунок 15.4** Изображение любезно предоставлено ВР / доктором Питером Харрисом из Университета Рединга.

Массу частицы можно выразить в терминах степенного закона, зависящего от ее диаметра:

$$D_{\text{fm}} - \text{радио} m \propto d_{\text{мо}}^3$$

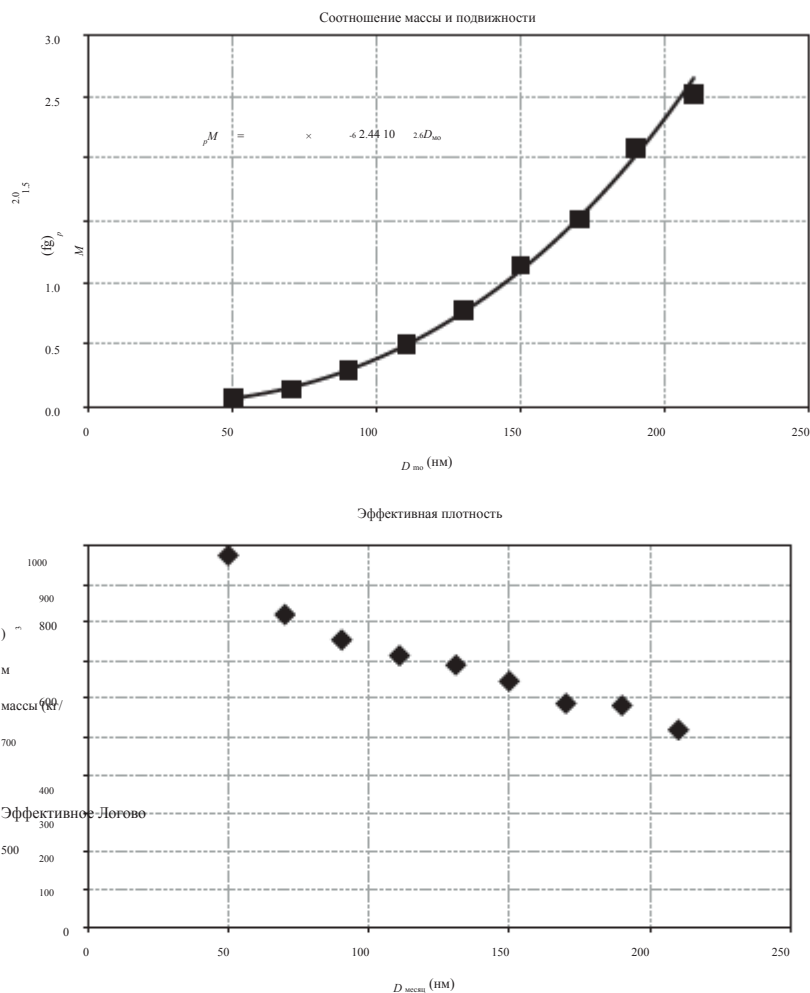
- показатель *массово-подвижности* (также известный как гидроразрыв, основанный на подвижности диаметра, где D_{fm} общее измерение, которое отличается от фрактального измерения, основанного на радиусе вращения).

Для сферических частиц, $D_{\text{fm}} = 3$, и для частиц агломерата, таких как частицы в-режим регулирования выбросов твердых частиц двигателем, $2 < D_{\text{fm}} - \text{радио} < 3$. Для того, чтобы определить $D_{\text{fm}} - \text{радио}$

для

источника аэрозоля необходимо измерить как диаметр, так и массу частиц

. Выбор размера обычно выполняется с помощью DMA, а выбор массы - последовательно с помощью электроцентрифужного анализатора массы частиц, такого как APM (Park *et al.*, 2003) или CPMA (Олферт, Симондс и Коллингс, 2007). Используя CPC в качестве детектора, можно определить максимальную массу для данного диаметра подвижности и рассчитать эффективную плотность частиц как функцию диаметра (рис. 15.5). С помощью этой техники припаркуйтесь *et al.* (2003) обнаружили, что показатель отношения массы к подвижности сажи в тяжелых условиях эксплуатации для различных двигателей составляет от 2,33 до 2,41, а Олферт, Симондс и Коллингс (2007) обнаружили, что для одного дизельного двигателя Peugeot показатель отношения массы к подвижности варьировался от 2,22 до 2,48 и достигал 2,76 при более высокой нагрузке. Высокая масса-мобильность показатель для сажевых частиц, как правило, указывает на то, что всасываются летучие мате- риал заполнения агломерат структуры; частица, таким образом, становится более сферической'. В случае с двигателем Peugeot считалось, что летучим веществом является сульфат. Сажа от газомоторных двигателей, как правило, имеет более высокий показатель соотношения массы и подвижности, чем от дизельных двигателей, что свидетельствует о более высоком содержании полунлет-ких веществ в потоке выхлопных газов.



(а) соотношение массы и подвижности и (б) измеренная эффективная плотность дизельной сажи Рисунок 15.5 с помощью тандема DMA-CPMA (режим холостого хода, $D_{mob, радио} = 2.6$). Данные предоставлены Cambustion, используется с разрешение.

Альтернативой тандемному эксперименту DMA-CPMA или эквивалентному ему является использование измерения аэродинамического диаметра в тандеме с DMA, таким как ELPI. Этот метод был использован, например, Мариком и Сюем (2004). Поскольку аэродинамический диаметр зависит от массы, эффективную плотность можно рассчитать как функцию диаметра подвижности путем сравнения подвижного и аэродинамического диаметров, и из этого можно получить показатель зависимости массы от подвижности. Марик и Сюй (2004) получили фрактальную размерность, основанную на диаметре подвижности, для сажи дизельных автомобилей, равную 2,3.

Один раз D_{fm} если было определено, что можно использовать спектральные приборы для оценки массы частиц по спектру заданного размера (Киттельсон). *et al.*, 2004). Если для этого расчета используется дискретный спектр размера частиц, то он подвержен чрезмерному шуму от каналов, представляющих самые крупные частицы; они имеют наибольшее значение при расчете, поскольку они самые тяжелые. Одно из решений этой проблемы состоит в том, чтобы сопоставить логарифмически нормальную функцию с данными (которая подавляет спектральный шум в хвосте функции), затем использовать уравнения Хэтча-Чоута для вычисления

диаметр средней массы и масса - это для расчета общей массы частиц (Symonds *et al.*, 2007).

15.6 Методы улучшения состояния

15.6.1 Топливный состав

Мы уже видели, что уменьшение содержания примесей серы в топливе может резко снизить содержание сульфатной фракции моторного аэрозоля и что металлоорганические присадки к топливу могут оказывать эффект подавления образования сажи (хотя они могут приводить к увеличению количества золы). Качество сгорания дизельного топлива определяется его *цетановым числом*. Это показатель задержки воспламенения топлива: задержка между воспламенением и обнаруживаемым повышением давления. С одной стороны, уменьшение цетанового числа топлива и, следовательно, увеличение задержки воспламенения позволяет увеличить время для захвата воздуха, способствуя сгоранию предварительно смешанной смеси, и, следовательно, может снизить выбросы углеродистой сажи (Li, Чиппиор и Гюльдер, 1996); с другой стороны, это может привести к увеличению выбросов органических фракций из-за увеличения вероятности столкновения со стенкой.

В последние годы в топливных смесях все чаще используются биотопливо, такое как биодизельное топливо, простые эфиры (такие как диметиловый эфир, DME) и этанол. Биодизельное топливо состоит из молекул длинноцепочечного сложного эфира

. Помимо других их преимуществ в отношении окружающей среды и экологичности (хотя они не лишены противоречий), присутствие кислорода в этих веществах приводит к

уменьшению образования сажи при горении (Yage, Чунг и Хуанг, 2009), хотя

иногда можно наблюдать увеличение выброса летучих частиц (Northrop., 2011). *et al*

В настоящее время точно неизвестно, почему присутствие оксигенатов приводит к снижению образования сажи

, хотя это может быть так же просто, как обеспечение большего количества кислорода для горения (Ракопулос, Антанопулос и Ракопулос, 2006).

15.6.2 Контроль за счет конструкции двигателя и калибровки

Снижение выбросов твердых частиц за счет конструкции двигателя и *калибровки* (настройка условий эксплуатации двигателя с помощью электронной системы управления двигателем) является привлекательным вариантом для производителей двигателей, поскольку часто это может существенно изменить ситуацию без дополнительных затрат и усложнения систем последующей обработки (например, Klindt, 2010).

Давление топлива и время подачи являются одними из наиболее важных калибровочных параметров, влияющих на выбросы твердых частиц. При увеличении давления топлива увеличивается расстояние от форсунки

до зоны горения, что увеличивает количество воздуха, увлекаемого

распылителем, делая локальную топливовоздушную смесь более сжиженной и уменьшая количество несгоревшего и частично несгоревшего топлива, что, в свою очередь, снижает выбросы твердых частиц (Пикет и Зиберс, 2004). Возникающие

в результате этого более высокие температуры сгорания также приводят к более высокой скорости окисления сажи в цилиндре

. Конечно, если давление впрыска повышено слишком сильно, топливо может попасть на

стенки цилиндра или поршень, что приведет к *увеличению* выбросов, в том числе твердых частиц.

Возникающее в результате этого повышенное давление в цилиндре во время сгорания топлива также может привести к повреждению двигателя.

Впрыск дополнительного топлива после основного впрыска, известный как пост-впрыск,

может быть эффективным средством снижения выбросов ТЧ (Desantes *et al.*, 2011). Разделение

впрыска означает, что каждая инъекция приводит к получению менее насыщенной локально смеси. Однако необходимо

соблюдать осторожность, чтобы не запоздать с последующей подачей и не охладить заряд, что приведет к уменьшению окисления сажи в цилиндре. Относительное пол

GDI,

и независимо от того, подается ли топливо по поверхности поршня или локализуется в районе свечи зажигания, это также может существенно повлиять на количество и характер выбросов твердых частиц (цена *et al.*, 2006).

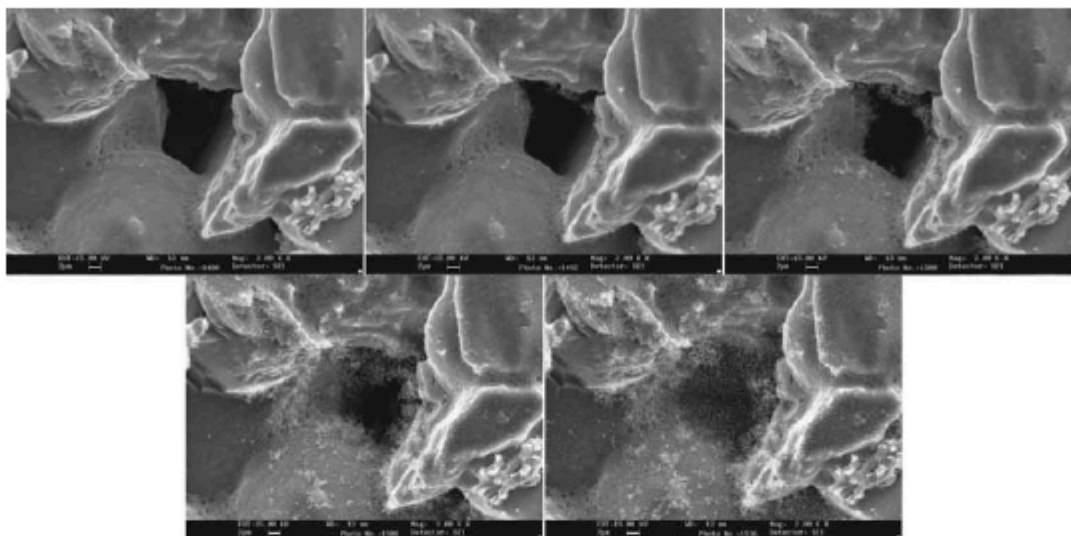
Система рециркуляции отработавших газов (EGR) была введена для снижения уровня выбросов. Часть отработавших газов рециркулируется обратно во впускной коллектор (по существу, инертный газ, который охлаждает процесс сгорания за счет снижения теплоемкости и разбавления кислорода), тем самым уменьшая реакции азота и кислорода, благоприятные при высоких температурах, которые приводят к образованию NO. Однако побочным эффектом EGR является увеличение выбросов твердых частиц из-за снижения доступности кислорода. Компромисс между ОТСУТСТВИЕМ_x и выбросы твердых частиц, возникающие в результате изменения количества используемого EGR, представляют собой сложную задачу для калибраторов двигателя.

15.6.3 Сажевые фильтры

В последние годы DPF обеспечил очень эффективное решение проблемы выброса нанодисперсных частиц дизельными двигателями. DPF состоят из (обычно) керамической подложки, помещенной в металлический контейнер в выхлопной системе автомобиля. Наиболее распространенной конструкцией подложки является тип настенного потока (Howitt and Montierth, 1981), в котором формируется сетка каналов по длине подложки, при этом альтернативные каналы перекрываются на альтернативных концах. Выхлопные газы поступают через любой из 50% каналов, открытых со стороны двигателя DPF, частицы удаляются по мере прохождения потока газа через стенку межканала, а уменьшенный по количеству частиц поток газа поступает в каналы, которые открыты на конце выхлопной трубы. Такая конфигурация позволяет максимально увеличить площадь поверхности, доступную для фильтрации, при заданном объеме фильтра. В состав обычных материалов основы входят кордиерит и карбид кремния. SiC имеет более высокую температуру плавления, чем кордиерит, но он обладает высоким коэффициентом теплового расширения, что гарантирует, что фильтры из SiC изготавливаются секционными (которые цементируются для формирования общей основы), чтобы обеспечить тепловое расширение.

На микромасштабе стенки DPF содержат множество пор неправильной формы. Первоначально, когда DPF чистый, фильтрация происходит за счет осаждения стенок пор (рис. 15.6). Через некоторое время сажа оседает на стенках пор. По мере заполнения этих пор противодавление в DPF, вызванное прокачкой газа двигателем через него, быстро возрастает. В конце концов, большая часть пор заполняется, и происходит фильтрация через слой сажи на стенках канала - так называемая стадия фильтрации осадка. По мере поступления большего количества сажи толщина слоя торта увеличивается, а противодавление продолжает повышаться, хотя и более медленными темпами, чем на стадии заполнения пор. Производительность DPF обычно выражается в терминах его эффективности фильтрации. Когда DPF чистый, в начале стадии заполнения пор, его эффективность фильтрации может составлять всего 50%, но по мере того, как DPF начинает заполняться, его эффективность быстро возрастает. На стадии фильтрации осадка эффективность может достигать более 99%. Это учтено в протоколах испытаний на выбросы.

В конце концов, средство наполняет копоть до такой степени, что противодавление становится detrimental на работу двигателя (или, скорее, убытки, сажевого фильтра, как описано ниже). На этом этапе необходимо *выполнить регенерацию* DPF. Существует две формы регенерации, которые в разной степени применимы к различным системам DPF. При пассивной регенерации сажа непрерывно и медленно окисляется под термическим воздействием потока выхлопных газов. Чтобы сделать эту реакцию более благоприятной при более низких температурах, можно использовать каталитические покрытия на подложке DPF или каталитические присадки к топливу. При активной регенерации автоматизированный процесс вызывает



Оптическая микроскопия прогрессивного заполнения пор DPF. Воспроизведено с разрешения автора Рисунок 15.6 из Payne, 2011.

DPF подлежит регенерации, когда система управления двигателем обнаруживает достаточно большое падение давления в DPF. Методы активной регенерации обычно предполагают изменение стратегии управления двигателем (например, изменение времени впрыска), вызывающее повышение температуры выхлопных газов. Другие методы включают впрыск топлива в поток выхлопных газов и электрический нагрев. Во время регенерации обычно приходится платить за эффективность и экономию топлива.

Окисление сажи может происходить в результате реакции либо с кислородом, либо БЕЗ него₂ (который обычно присутствует в выхлопных газах дизельных двигателей). Один из вариантов DPF, непрерывно регенерирующая ловушка (CRT; Купер и Тосс, 1989), использует катализатор окисления перед фильтром для окисления NO до NO₂. Сгорание без₂ может происходить при нормальной рабочей температуре выхлопных газов ($\approx 250^\circ\text{C}$) и, таким образом, этот вариант улучшает эффективность пассивной регенерации.

Активная регенерация происходит при температурах, превышающих 600°C , и реакция окисления сама по себе является экзотермической. Достигаемые температуры могут превышать 1000°C , что может вызвать значительную нагрузку на керамическую подложку. Максимальное противодавление, достигаемое до начала активной регенерации, на практике может быть намного меньше того, которое само по себе допустимо двигателем, чтобы предотвратить накопление абсолютной массы сажи на фильтре до такого уровня, при котором тепло, выделяющееся во время регенерации, необратимо повреждает основание.

Следует помнить, что DPF наиболее эффективны при удалении твердых частиц, то есть углеродистой и зольной фракций. Частицы в режиме зарождения могут, как правило, даже не образовываться до выпуска отработавших газов или реального разбавления, поэтому они могут проходить через DPF в качестве своих предшественников в газовой фазе. Обычно летучие материалы адсорбируются на твердых частицах, что означает, что если твердые частицы были удалены с помощью DPF, может быть ускорено гомогенное образование зародышей летучих веществ, проходящих через DPF в виде частиц. Образование серной кислоты в DOC и ее десорбция из DOC и DPF могут быть усилены в высокотемпературных условиях регенерации DPF, и во время регенерации наблюдалось большое количество аэрозоля для образования зародышей (Campbell *et al.*, 2006).

DPF также улавливает частицы золы (включая любые, образующиеся из топливных добавок, предназначенных для катализации регенерации), но они обычно не удаляются регенерацией. Хотя доля золы в выхлопных газах двигателя невелика, со временем это может привести к постепенному снижению производительности DPF.

Широкое внедрение DPF было обусловлено все более строгим законодательством, таким как проект PMP и стандарты Евро 5 и 6 для двигателей малой и тяжелой мощности в Европе и стандарт US2007 для двигателей большой мощности в США (автомобили с легким дизельным двигателем там пока не распространены). Ряд модифицированных программ Глоб- союзник, особенно для внедорожных машин (особенно транспортные средства, используемые в закрытых помещениях или в замкнутых пространствах). Был модернизирован ряд автобусных парков, и в Европе широко распространены зоны с низким уровнем выбросов, что требует дооснащения DPF.

С появлением стандартов выбросов Евро-6, который введет стандарт количества твердых частиц в выбросах бензиновых двигателей, некоторые производители рассматривают возможность использования сажевых фильтров для бензина (GPF, например, Mikulic *et al.*, 2010). Из-за повышенных температур, связанных с сгоранием бензина, непрерывная термическая пассивная регенерация, как правило, является особенностью GPFs. Это означает, что уровень заполнения сажей, необходимый для оптимальной эффективности фильтрации, может никогда не быть достигнут. Однако, поскольку уровень выбросов твердых частиц даже от бензиновых двигателей с непосредственным впрыском намного ниже, чем у дизельных двигателей, величина затухания, требуемого от GPF, обычно намного меньше, чем требуется для DPF.

Благодарности

Автор хотел бы поблагодарить профессора Ника Коллинга с инженерного факультета Кембриджского университета и Криса Николауса, Марка Пекхэма и Кингсли Ривелла из Combustion за их полезные предложения.

Список литературы

- Абдул-Халек И., Киттельсон Д.Б. и Бреар Ф. (2000) Рост наночастиц при разбавлении-очистка и охлаждение выхлопных газов дизельного топлива: экспериментальное исследование и теоретическая оценка. Технический документ SAE 2000-01-0515. Алвик П., Нциахристос Л., Кескинен Дж. и Виртанен А. (1998) Измерение в реальном времени-улучшения гранулометрического состава дизельного топлива с помощью электрического ударного устройства низкого давления. Технический документ SAE 980410.
- Андерссон Дж., Джехаскель Б., Муньюс-Буэно Р. *et al.*, (2007) Измерение частиц
- Программа (PMP): Заключительный отчет межлабораторного корреляционного исследования малой мощности (ILCE_LD), Объединенный исследовательский центр Европейской комиссии, <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29wgs/wp29grpe/grpeinf54.html> (последнее обращение 8 августа 2013 г.). Андерссон Дж., Мамакос А., Гихаскиэль Б., Карьеро М. и Мартини Г., (2010)
- Программа измерения частиц (PMP): Тяжелая межлабораторная корреляция
- Заключительный отчет (ILCE_HD), Объединенный исследовательский центр, Ispra <http://www.unece.org>
- <http://www.unece.org/unece/dev/coloway/ch/fileadmin/DAM/trans/doc/2009/wp29grpe/PMP-24-02e.pdf> (последнее обращение 15 августа 2013 г.).
- Бурчер Х. (2005) Физическая характеристика выбросов твердых частиц дизельными двигателями: areview. *Научный журнал по аэрозолям*, 36, 896-932.

- Баззард, Н.А., Кларк, Н.Н. и Гаффи, С. Е. (2009) Исследование воздействия на пешеходов к выбросам выхлопных газов вблизи транспортных средств. *Здоровье окружающей среды*, 8 (13). doi: 10.1186/1476- 069X-8-13.
- Кэмпбелл Б., Пекхэм М., Саймондс Дж. *et al.*, (2006) переходная газообразных и экономически-поздно замеры выбросов на дизельных легковых автомобилей, в том числе регенерация DPF событие. Технический документ SAE 2006-01-1079.
- Карпентьеры М., Кумар П. и Робинс А. (2011) Обзор экспериментальных результатов и моделирование дисперсии наночастиц в следах движущихся транспортных средств. *Окружающая среда Наука и технологии*, 159, 685 - 693. Купер, Б.Дж. и Тосс, Дж.Э. (1989) Роль NO в контроле выбросов твердых частиц дизельного топлива. Технический документ SAE 890404.
- Дек, Дж.Э. (1997) Концептуальная модель сгорания дизельного топлива-Ди-лазерно-лист Томография. Технический документ по SAE 970873.
- Десантес Дж.М., Бермудес В., Гарсия А. и Линарес В.Г. (2011) Всестороннее исследование распределения частиц по размерам с использованием стратегий постинъекции в дизельных двигателях внутреннего сгорания. *Наука и технология аэрозолей*, 45 (10), 1161-1175. Иствуд, П. (2008) *Выбросы твердых частиц транспортными средствами*, SAE International / Джон Уайли & Sons, Ltd, Чичестер.
- Эхара К., Хэгвуд К. и Коукли К.Дж. (1996) Новый метод классификации частиц аэрозоля-согласно их отношению массы к заряду - масс-анализатор аэрозольных частиц. *Журнал аэрозольной науки*, 27 217-234. Фортун, Дж.П.Ф., Ван Дорланд, Р., Вобен, В.М.Ф. и Келдер, Х. (1995) Парниковые эффекты выбросов воздушных судов, рассчитанных с помощью модели переноса излучения. *Геофизические летописи*, 13(4), 413-418.
- Фудзивара Ю., Тосака С. и Мураяма Т. (1993) Процесс формирования SOF в Com-запорная камера дизельных двигателей IDI. Технический документ SAE 932799.
- Гидни, Дж. Т., Твигт, М.В. и Киттельсон, Д. Б. (2010) Влияние металлоорганических топливных добавок на выбросы наночастиц легковым автомобилем, работающим на бензине. *Наука об окружающей среде и технологии*, 44(7), 2562- 2569. Гривз Г. и Ванг К.Х.Т. (1982) Происхождение выбросов твердых частиц дизельного топлива. SAE Технический документ 810260.
- Хэнде Т., Николаус К., Симондс Дж. и Финч А. (2010) Выбросы частиц в реальном времени. для 2-тактных мотоциклов с системой отбора проб PMP и без нее. Технический документ SAE 2010-32-0047. Хейвуд, Дж.Б. (1988) *Двигатель Внутреннего Сгорания Основы* Макгро-Хилл Интерна-онные издания.
- Ховард, Джей-Би и Кауши, от J. W. (1980) контроль сажи на топливных присадках. *Прогресс в области энергетики и науки сгорания*, 6, 263- 276.
- Ховитт, Дж.С. и Монтъерт, М.Р. (1981) Ячеистый керамический сажевый фильтр для дизельного топлива. SAE Технический документ 810114.
- Джонсон, Т., Кэлдоу, Р., Почер, А. *et al.*, (2004) Спецификация определения частиц выхлопных газов двигателя-тромер для измерения частиц в переходных выбросах. Технический документ SAE 2004-01- 1341. Джонсон Б.Т., Харгрейв Г.К. и Рид Б. (2011) Отбор проб ТЧ из картера сгоревшего и двигатель с воспламенением от сжатия. Технический документ SAE 2011-24-0209.

- Юнг Х., Киттельсон Д.Б. и Захария М.Р. (2003) Влияние моторных смазок
Масла на выбросы наночастиц и кинетику окисления. Технический
документ SAE 2003- 01-3179. Като С., Такаяма Ю., Сато
Г.Т. *et al.*, (1997) Исследование образования твердых частиц
дизельного двигателя DI с прямым отбором проб из камеры сгорания.
Технический документ SAE 972969. Каваи Т., Гото Ю. и Одака М.
(2004) Влияние процесса разбавления на выхлопные газы двигателя
Наночастицы. Технический документ SAE 2004-01-0963.
Киттельсон, Д.Б. (1998) Двигатели и наночастицы: обзор. *Научный журнал по аэрозолям.*,
29(5/6), 575- 588.
Киттельсон Д., Хэндс Т., Николаус С. *et al.*, (2004) Массовая корреляция выбросов двигателя *et al*
со спектральными приборами. Материалы ежегодного конгресса SAE Японии
2004 года. Документ № 20045462. Клиндт К. (2010) Снижение количества
выбросов твердых частиц в дизельных бензиновых двигателях. Профессиональный-
конференция по определению направлений в области
исследований эффективности двигателей и выбросов (DEER) епсе. Кумар П.,
Робинс А., Вардулакис С. и Бриттер Р. (2010) Обзор характеристик
наночастиц в городской атмосфере и перспективы развития
нормативного контроля выбросов. *Транспортная экология*, 44, 5035-5052.
(1996) Влияние свойств топлива на выбросы выхлопных газов-
характеристики одноцилиндрового дизельного двигателя DI. Технический документ SAE 962116.
Лю, З.Г., Васис, В.Н., Деттманн, М.Э. *et al.* (2009) Сравнение стратегий для МЭС-
контроль массовых выбросов дизельных двигателей, выбрасывающих сверхнизкие уровни
твердых частиц. *Наука и технология в области аэрозолей.*, 43 (11), 1142 - 1152.
Luukkainen, J., Jokiniemi, J., Kauppinen, E.I. *et al.* (2004) Сравнение различных разведений
методы измерения выбросов твердых частиц дизельным топливом. *Наука и технология в области аэрозолей*, 38 ,
12- 23.
Мандельброт Б. (1982) *Фрактальная геометрия природы*, Фримен, Сан-Франциско, Калифорния.
Марик, М.М., Чейз, Р.Э., Подсадлик, Д.Х. и Фогт, Р. (1999) Частицы выхлопных газов транспортных средств
Распределение по размерам: Сравнение измерений выхлопной трубы и смесительного
канала. SAE Технический документ 1999-01-1461. Марик М.М.
и Сюй Н. (2004) Эффективная плотность и фрактальная размерность сажи раг-
частицы от предварительно смешанного пламени и выхлопных газов автомобилей. *Научный журнал по аэрозолям.*, 35 ,
1251- 1274.
Микулич И., Кельман Х., Майковский С. и Восейпка П. (2010) Исследование о частице
применение фильтра на современном дизельном двигателе с турбонаддувом объемом
2 л. *Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, 19 1-18. Миллер К.А.,
Сисковик Д.С., Шеппард Л. *et al.* (2007) Длительное воздействие атмосферного воздуха
загрязнение окружающей среды и частота сердечно-сосудистых событий у женщин. *Медицинский
журнал Новой Англии.* , 356 447-458.
Нортроп, В.А., Мадатил, П.В., Бохач, С.В. и Ассанис, Д.Н. (2011) Конденсация
рост твердых частиц при частично предварительно смешанном низкотемпературном сжигании
биодизеля в двигателе с воспламенением от сжатия. *Наука и технология в области аэрозолей.*, 45(1),
26-36. Олферт Дж. и Коллингс
Н. (2005) Новый метод классификации частиц по массе - центробежный анализатор массы частиц Соу-
ette. *Научный журнал по аэрозолям*, 36, 1338 - 1352.

- Olfert, С. Дж., Симонс, Дж. П. Р. и Коллингс, Н. (2007) эффективная плотность и фрактал размер частиц, вылетающих из малой грузоподъемности с дизельным катализатором окисления. *Научный журнал по аэрозолям*, **38**, 69 - 82. Парк К., Цао Ф., Киттельсон Д.Б. и Макмарри П.Х. (2003) Взаимосвязь между частицами масса и подвижность частиц выхлопных газов дизельных двигателей. *Наука и технология в области охраны окружающей среды*, **37**, 577-583.
- Парк К., Киттельсон Д.Б. и Макмарри П.Х. (2003) Завершающее исследование концентрации аэрозольной массы - измерения концентрации: сравнение значений, полученных с помощью фильтров и путем прямых измерений распределения масс. *Атмосферная среда*, **37**, 1123- 1230. Парк К., Киттельсон Д.Б. и Макмарри П.Х. (2004) Структурные свойства выхлопных газов дизельного топлива частицы, измеренные методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ): взаимосвязь с массой и подвижностью частиц. *Наука и технология аэрозолей*, **38**, 881-889. Пейн С. (2011) Экспериментальные исследования фильтрации твердых частиц дизельного топлива. Докторская диссертация. Кембриджский университет
- Петцольд, А., Марш, Р., Джонсон, М. *et al.* (2011) Оценка методов измерения выбросы твердых частиц газовыми турбинами. *Наука и технология в области охраны окружающей среды*, **45**, 3562- 3568. Пикетт
- Л.М. и Зиберс Д.Л. (2004) Сажа в форсунках дизельного топлива: влияние температуры окружающей среды - температура, плотность окружающей среды и давление впрыска. *Горение и пламя*, **138**, 114-135.
- Pirho, ЭмДжей, Ambs, J. L. и Kittelson, Д. Б. (1986) в цилиндр замеры прежде всего - позднего формирования в косвенных Бензиновый инжекторный двигатель. Технический документ SAE 860024. Прайс П., Стоун Р., Кольтер Т. и Дэвис М. (2006) Твердые частицы и углеводороды - Измерения выбросов bon: Сравнение двигателей DISI первого и второго поколений с двигателями PFI в одноцилиндровых оптических двигателях. Технический документ SAE 2006-01-1263.
- Ракопулос, К.Д., Антанопулос, К.А. и Ракопулос, Округ Колумбия (2006) Многозонный мод - начало разработки топливных спреев для дизельных двигателей с использованием растительного масла, биодизельного или дизельного топлива. *Преобразование энергии и управление ею*, **47**, 1550-1573.
- Раманатан, В. и Кармайл, г. (2008) глобальных и региональных изменений климата за счет черный углерод. *Природе Наукам О Земле*, **1**, 221-227.
- Ривелл К., Хэндс Т. и Коллингс Н.А. (2002) Спектрометр твердых частиц с быстрым реагированием для определения горючих аэрозолей. Технический документ SAE 2002-01-2714.
- Шмид, О., Хаген, д.Э.Н., Уайтфилд, П.Д. *et al.* (2011) Методология определения характеристик частиц - определение содержания в выхлопных газах *Наука и технология аэрозолей*, **38**(11), 1108 - 1122.
- Саймондс, Дж.П.Р., Ривелл, К.С.Дж., Олферт, Дж.С. *et al.* (2007) Расчет массы дизельной сажи в режиме реального времени с помощью спектрометра дифференциальной подвижности. *Научный журнал по аэрозолям*, **38**, 52-68.
- R83 ЕЭК ООН (Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных Наций), (2011) Всемирный форум для согласования Правил эксплуатации транспортных средств, Правила № 83 - Выбросы загрязняющих веществ в соответствии с требованиями к моторному топливу, доступные на сайте <url>. <http://www.unecce.org/> / файловый администратор/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/r083r4e.pdf (последнее обращение 15 августа 2013 г.). АООС США (Соединенные Штаты Агентство по охране окружающей среды) (2002) оценки состояния здоровья доктор - Т. для выхлопа дизельных двигателей.

- Уильямс, Р.Л., Перес, Дж.М. и Гриффинг, М.Э. (1985) Обзор условий отбора проб
Воздействие на многоядерные ароматические углеводороды (PNA) из дизельных двигателей
большой мощности . Технический документ SAE 852081. Витце, П.О. и Грин,
Р.М. (2005) Сравнение топливных форсунок с одинарным и двойным распылением.
во время холодного запуска двигателя PFI с искровым зажиганием Используется визуализация
пленок жидкого топлива и возгорания в бассейне. Технический документ SAE 2005-01-3863. Яге
Д., Чунг К.С. и Хуанг З. (2009) Сравнение влияния биодизельного топлива на дизельное топливо
и этанола на дизельное топливо на выбросы твердых частиц дизельным двигателем с
непосредственным впрыском. *Наука и технология в области аэрозолей*, 43(5), 455- 465.

Перемещение биоаэрозолей в Атмосфере и последствия для климата и эволюции микроорганизмов

Синди Э. Моррис, Кристиль Лейронас и Филипп К. Нико

INRA, UR407 de Pathologie Végétale, France

16.1 Введение

Присутствие биоаэрозолей в атмосфере имеет множество последствий для здоровья людей, животных и растений, для различных биогеохимических и атмосферных процессов, а также для сохранения и технического обслуживания зданий и памятников. "Биоаэрозоли" относятся к частичному аэрозолю биологического происхождения. Основными типами биоаэрозолей являются первичные и вторичные биологические аэрозоли, а также биогенные аэрозоли. Первичные биологические аэрозоли представляют собой частицы организмов или интактные клетки. Они могут быть живыми или мертвыми. Вторичные биологические аэрозоли образуются в результате физических или химических процессов (конденсация, окисление, покрытие и т.д.), которые модифицируют первичные биологические аэрозоли. Они отличаются от биогенных аэрозолей, которые являются продуктами метаболизма и часто подвергаются вторичным химическим процессам, приводящим к их воздействию на атмосферу. Они включают диметилсульфид и другие летучие органические соединения углерода, такие как, например, метан. Принимая во внимание, что материалы из небиологических источников (такие как сульфаты, сажа, нитраты, минеральная пыль и морская соль) и органический углерод от лесных пожаров составляют основную часть атмосферных аэрозолей (Маховальд *et al.*, 2011), первичные биологические аэрозоли могут составлять до 25% аэрозольных частиц размером 0,2- 50,0 мкм (Jaenicke, 2005). Очень подробное представление о первичных биологических аэрозолях дает Дебре *et al.* (2012). Первичные биологические аэрозоли содержат различные формы microorganism, в том числе бактерий или водорослей агрегатов и одиночные клетки, споры грибов и бактерий,

фрагменты грибкового мицелия и вирусные частицы. Они могут также исходить от *macroorganisms*; они включают насекомых, пыльцу растений, папоротников и мхов споры, кусочки растительной ткани, фрагменты тканей животных, и так далее.

Присутствие микроорганизмов в атмосфере было впервые обнаружено более 200 лет назад Спалланцани в середине восемнадцатого века (Капанна, 1999), а его открытия были расширены Пастером в конце девятнадцатого века (Пастер, 1890). В начале двадцатого века горизонты аэриологии расширились благодаря открытию, что споры некоторых грибов переносятся вверх на несколько километров над поверхностью земли. Это было обнаружено командой Э.К. Стакмана из Университета Миннесоты в 1921 году, воз использовав различные устройства для отбора проб спор, установленные на самолетах армии США, во время 50 полетов над фронтом эпидемии стеблевой ржавчины пшеницы, когда она распространилась из южного Техаса в южный Вайоминг (Stakman *et al.*, 1923). Эти эксперименты впервые продемонстрировали, что микроорганизмы присутствуют в атмосфере на высотах облаков и за их пределами, и открыли путь для серии последующих попыток отбора проб на больших высотах, в некоторых из которых участвовали выдающиеся пилоты, включая Чарльза Линдберга. Аэриология снова достигла новых высот, когда метеорологические ракеты и воздушные шары были использованы для отбора проб атмосферы, что выявило присутствие бактерий и грибов за пределами тропосферы на высотах до 70 км (Имшенецкий, Лысенко и Казаков, 1978; Уэйнрайт *et al.*, 2003). Хотя большая часть исследований в области аэриологии была сосредоточена на выбросе и распространении пыльцы, возобновился всплеск исследований микробного компонента первичных биологических аэрозолей, поскольку это дает возможность одновременно изучать различные темы исследований, включая перенос на большие расстояния, взаимодействие частиц с климатом, атмосферу как среду обитания и влияние воздушного распространения на эволюционную историю организмов и ее последствия для эпидемиологии заболеваний. Поэтому в этой главе основное внимание будет уделено микроорганизмам в атмосфере.

В этой главе мы обсудим происхождение и перенос микробных популяций в атмосфере и их взаимодействие с физическими и химическими свойствами атмосферы. Мы уделим особое внимание методологии, используемой для изучения этих явлений, и динамике выявленных процессов. Несмотря на достигнутый в прошлом прогресс в изучении взаимодействия микроорганизмов с атмосферой, коммуникация и сотрудничество между разрозненными дисциплинами, которые вносят вклад в эти исследования (физика, биология, история и моделирование), по-прежнему затруднены сложностью определенных концепций и явлений. Поэтому в этой главе мы попытаемся представить несколько упрощенное изложение некоторых особенно сложных тем. Это не означает умаления важности технических и теоретических основ, лежащих в основе этих предметов, а скорее позволяет читателю построить интеллектуальную основу для рассуждений, которая затем может быть обогащена точными деталями, если и когда это станет необходимым.

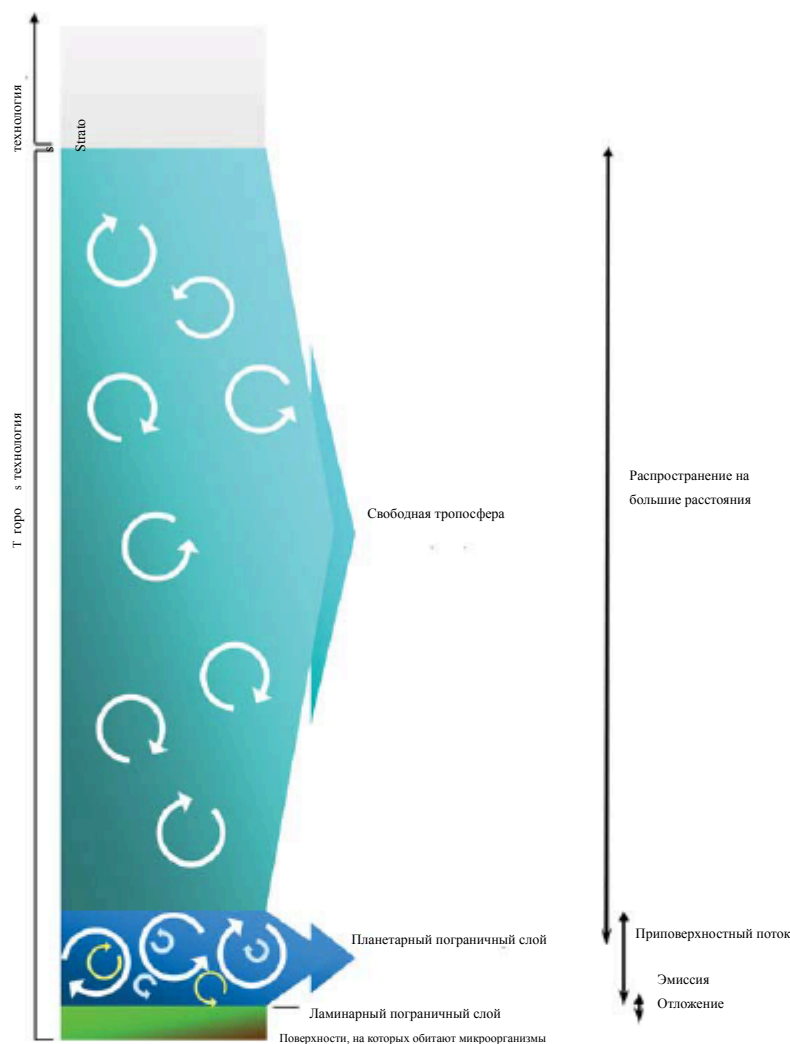
Источники микроорганизмов в наружном воздухе (в частности, растения, почва и водные поверхности) и экология микроорганизмов в этих средах обитания были хорошо описаны. Кроме того, недавние отчеты, обзоры и книги предоставили значительную информацию о разнообразии и биологии атмосферных микроорганизмов, включая облака, и методах, используемых для этих исследований (Лейси и Уэст, 2006; Амато *et al.*, 2007; Броди *et al.*, 2007; Берроуз, 2009b; Фролик-Новыйский *et al.*, 2009; Делорт *et al.*, 2010; Бауэрс *et al.*, 2011; Després *et al.*, 2012). Наш рассказ начнется с запуска микроорганизмов в атмосферу из этих источников и расскажет об их восхождении и их судьбе в атмосфере

в контексте основных тропосферных процессов, которые способствуют этому переносу, как показано на рисунке 16.1. Запуск, или эмиссия, хорошо изучен для определенных микроорганизмов, таких как грибы, но остается довольно неуловимым для других. Последующий перенос в пограничном слое земли (либо подъем, либо осаждение) - это процесс, конечный результат которого может быть измерен, но в настоящее время такие измерения все еще являются сложной задачей. Микроорганизмы, которые успешно достигают свободной тропосферы, обычно являются микроорганизмами, аэродинамические свойства которых позволяют оценить их траекторию с помощью тех же инструментов, которые используются для прогнозирования распространения очень легких твердых частиц или газов. Находясь во взвешенном состоянии в атмосфере, микроорганизмы могут играть те же четыре основные роли, что и инертные аэрозоли, которые имеют большое значение для климата и качества воздуха (Маховальд *et al.*, 2011). Они могут отражать свет, они могут участвовать в химических реакциях, они могут быть ядрами конденсации облаков (CCN), и они могут быть ядрами льда (IN). Но в отличие от инертных аэрозолей, эти взаимодействия могут иметь последствия для эволюционной истории живых микроорганизмов, составляющих биологические аэрозоли. В этой главе будут рассмотрены эти взаимодействия с атмосферой: как микроорганизмы могут влиять на атмосферные процессы и как распространение влияет на историю жизни

16.2 Выброс: Запуск в атмосферу

Конкретные механизмы, участвующие в выбросе микробных частиц в атмосферу из их источника, можно рассматривать как большой черный ящик аэробиологии. Хотя были описаны общие процессы, связанные с пассивными и активными выбросами с сухих и влажных поверхностей, наша способность прогнозировать и количественно оценивать эти выбросы все еще находится в сфере предположений. Эмиссия имеет решающее значение для выхода микроорганизмов из ламинарного пограничного слоя, который окружает поверхности, на которых они растут или прикрепляются, и перемещения в планетарный пограничный слой, где они могут начать свое путешествие (рис. 16.1).

Хотя механизмы эмиссии и аэрозолизации бактерий были изучены (Норы *et al.*, 2009a; Саймон *et al.*, 2011), самая подробная информация об микроорганизмах излучение приходит от изучения грибов (Ингольд, 1965; Meridith, 1973). Подобно другим биологическим частицам, споры грибов могут выбрасываться в воздух с помощью пассивных механизмов, включающих поступление энергии из внешнего источника (ветер, сельскохозяйственные методы, такие как сбор мусора и т.д.). Это приводит к выбросу не только самих грибковых спор, но и любых микробных "попутчиков". Споры грибов часто могут переносить на своей поверхности другие микроорганизмы, например, когда споры рыхлой головки пшеницы и ячменя переносят споры грибка, вызывающего спорынью (Cherewick, 1953), или когда уредоспоры ржавчины переносят бактерии (French, Novotny, and Searles, 1964; Дозэрти и Прис, 1978). Но особенность грибов заключается в том, что их споры также могут высвобождаться с помощью активных механизмов, посредством которых они выбрасываются в атмосферу с помощью сложных механизмов, включающих специализированные грибковые структуры и изменения давления в тканях из-за увлажнения и высыхания. Оба типа выбросов зависят от микроклиматических параметров (Meridith, 1973; Aylor, 1990). Эти механизмы высвобождения необходимы для выхода спор и других мелких биологических частиц из ламинарного пограничного слоя и достижения ими турбулентного пограничного слоя, где они могут широко рассеиваться.



Вертикальный диапазон и двигатели переноса микроорганизмов в атмосфере. На Рисунке

16.1 чтобы стать частью аэрозолей, переносимых в атмосфере, микробные клетки, споры или частицы, содержащие микроорганизмы, выбрасываются с поверхностей, на которых они находятся (главным образом, с листьев, почвы и воды). В некоторых случаях эти поверхности находятся под навесами растений глубиной от нескольких сантиметров до десятков метров, как в лесах. Отсюда они могут переместиться в планетарный пограничный слой Земли, глубина которого составляет несколько километров. На движение биологических аэрозолей в этой части тропосферы могут сильно влиять вихри, вызванные тепловой конвекцией, и топографические особенности земной поверхности (обозначены изогнутыми стрелками на рисунке). Частицы могут подниматься с помощью восходящих конвективных и турбулентных вихрей. Они опускаются из-за осадков, турбулентных завихрений или когда сила тяжести преодолевает восходящие силы и сопротивление воздуха. Результат этих вертикальных перемещений называется "поток": количество частиц, проходящих через "окно" данной поверхности в единицу времени в чистом направлении вверх или вниз. Частицы также могут перемещаться горизонтально в планетарном пограничном слое. Вер-ской поток в планетарном пограничном слое (так называемый 'приповерхностного потока) и горизонтальных движений очень сильно зависит от топографических особенностей поверхности земли, и особенно с переменным состоянием. Напротив, прямой улавливание биологических аэрозолей с целью описания их движения сложнее в свободной тропосфере из-за более низкой плотности биологических аэрозолей по сравнению с плотностью в пограничном слое планеты. Поэтому модели атмосферной циркуляции обычно используются для оценки движения биологических аэрозолей, а также многих других типов аэрозолей в этой части тропосферы. Частицы могут пересекать границу тропосфера -стратосфера. Однако именно в тропосфере они могут влиять на процессы с последующим воздействием на климатические процессы, и именно там у них больше всего шансов выжить, чтобы вернуться обратно на поверхность Земли.

16.2.1 Активное Высвобождение

Активное высвобождение распространено среди грибов определенных видов из семейства Ascomycota и Basidiomycota и было хорошо описано в нескольких обзорах (Meridith, 1973; Элберт *et al.*, 2007). У Ascomycota активное высвобождение спор зависит от реакции набухших клеток (asci) к водопроводу. Аскоспоры обычно выделяются после увлажнения дождем или росой. У Basidiomycota активный выброс базидиоспор обеспечивается быстрым движением капли жидкости по поверхности споры, называемой "катапультной поверхностного натяжения", которая вызывает быстрое смещение центра тяжести споры, ответственное за запуск. Споры могут выбрасываться на значительные расстояния в зависимости от вида гриба: 2-300 мм в случае аскоспор и 0,04-1,26 мм в случае базидиоспор (Джонс и Харрисон, 2004; Фишер *et al.*, 2010).

16.2.2 Пассивное высвобождение

Турбулентные движения ветра очень эффективны для поднятия всех видов материи в атмосферу. Замечательный и редкий случай, когда рыба (Пескарь, 1929) или лягушки уносятся в небо, а затем падают в виде дождя, может произойти при достижении скорости штормового ветра 160 км / ч. В таком случае легко увидеть, что легкого ветерка со скоростью 20 км / ч или легкого воздуха со скоростью 5 км / ч достаточно, чтобы поднять бактериальные клетки, вес которых измеряется в пикограммах, или грибковые споры весом менее микрограмма. На суше наземные части растений считаются основным источником микроорганизмов в атмосфере (Лайтхарт, 1997), при этом поверхности, покрытые растительностью, обычно являются более сильными источниками микробных аэрозолей, чем бесплодная или залежная почва (Линдеманн *et al.*, 1982; Лайтхарт и Шаффер, 1994; Лайтхарт, 1999). Образование аэрозолей, содержащих микроорганизмы, на поверхности растений, вероятно, является результатом воздействия ветра, который может непосредственно поднимать микроорганизмы, или вторичных воздействий, вызванных деформацией листьев, вызванной ветровым воздействием. Что касается грибковых спор, минимальная скорость ветра, необходимая для их удаления, варьируется в зависимости от вида (например, 0,36-0,5 м с⁻¹ для конидий из *Синегнойный кустарник* и 0,762 м с⁻¹

для эциоспор *Puccinia coronifera*) согласно

работе Степанова, описанной Грегори (1961). Порывы ветра более эффективны в удалении спор, чем обтекаемый ветер (Jarvis, 1962; Aylor, 1990). Переносу ветром могут способствовать приподнятые спороносные структуры, образующиеся на поверхности растительных тканей, обнаруженных у Deuteromycota (конидиеносцев). Эти структуры могут искривляться в результате быстрых изменений влажности атмосферы, что приводит к отделению спор (Фитт, Крейтон, и Бейнбридж, 1985). Снижение относительной влажности и повышенное воздействие инфракрасного и видимого излучения также могут привести к высвобождению конидий в результате уменьшения эффекта поверхностного натяжения (эффекта связывания), вызванного уменьшением влажности на поверхности листа (Jones and Harrison, 2004). Выделение грибковых спор также может быть результатом падения дождевых капель на пораженные ткани растений: воздуха, выбрасываемого при ударе дождевой капли о поверхность, может быть достаточно, чтобы поднять споры с этой поверхности; капля также может встряхнуть лист и таким образом придать импульс споре (Маккартни, 1991; Джонс и Харрисон, 2004).

Эти механизмы пассивного высвобождения были описаны для грибов, но очень вероятно, что они могут воздействовать и на другие биологические частицы. Силы ветра, капли дождя и различные виды деятельности человека могут привести к выбросу водорослей в атмосферу с растений, почвы и поверхностей зданий (Sharma *et al.*, 2007). С поверхности растений, в частности, биологические частицы могут уноситься ветром (хорошо известная пыльца), подниматься каплями дождя (бактерии) и высвобождаться, когда силы, связывающие воду, уменьшаются во время сушки, например

пример. Высыхание поверхности листьев происходит в результате биологических процессов или изменения атмосферных условий. Эти механизмы могут усугубляться изменениями заряда поверхности листьев в течение дня, которые изменяют электростатическое притяжение или отталкивание биологических частиц (Лич, 1987).

Над поверхностью воды образование аэрозолей, содержащих микроорганизмы, происходит в результате разрыва пузырьков. Когда волны разбиваются, их рассеянная энергия увлекает за собой плотный шлейф воздушных пузырьков в основной массе воды. Когда эти пузырьки поднимаются на поверхность, они лопаются, что приводит к образованию десятков-сотен пленочных и струйных капель (Фуэнтес *et al.*, 2010). Считается, что на морские аэрозоли приходится большая часть глобального аэрозольного потока (все типы аэрозолей, рассматриваемые в целом) (О'Дауд и де Леу, 2007), и их образование может способствовать присутствию биологических частиц в атмосфере в отдаленных регионах, таких как над центральной частью Северного Ледовитого океана (Лек и Бигг, 2005).

16.2.3 Количественная оценка выбросов

Были разработаны различные устройства для количественной оценки высвобождения микробных клеток или клеточных фрагментов и для оценки того, как на него могут влиять такие факторы, как скорость ветра, температура воздуха, влажность, субстрат для роста, виды микроорганизмов и возраст роста микроорганизмов (Харрисон и Лоу, 1987; Willoquet)..... (Harrison and Lowe, 1987; Willoquet)..... (влажность). *et al.*, 1998; Górný *et al.*, 2001; Шивасубрамани *et al.*, 2004; Kanaani *et al.*, 2009; Ли *et al.*, 2010). При превышении минимального порога скорости воздуха, большая часть доступных грибковых спор может высвобождаться в течение нескольких секунд или в течение длительного периода, в зависимости от вида и скорости ветра (Harrison and Lowe, 1987; Willoket *et al.*, 1998). Однако даже при наиболее благоприятных условиях высвобождения не все клетки или фрагменты клеток, доступные для высвобождения, на самом деле будут выброшены в атмосферу. Например, в одном эксперименте на листьях фасоли присутствовало менее 10% спор *B. fabae* и только 6,2% спор *B. cinerea* были унесены воздушными потоками со скоростью до 10 м с⁻¹

(Харрисон и Лоу, 1987).

Еще меньшая эффективность высвобождения (0,05 - 2,3%) наблюдалась для различных видов грибов на четырех строительных материалах, взятых из домов с проблемой плесени (Sivasubramani *et al.*, 2004). Экстраполяция на основе нелинейных моделей, представляющих влияние скорости ветра что касается эффективности высвобождения спор, то будет *et al.*

(1998) подсчитали, что скорость ветра не менее 25 м с⁻¹ было бы необходимо рассеять более 90% спор *Erysiphe necator* (син. *Uncinula necator*) присутствует на зараженных виноградных листьях. Исследования аэрозользации показали, что скорость фрагментации грибковых структур во время фазы высвобождения также зависела от вида и скорости ветра (Канаани *et al.*, 2009; Ли *et al.*, 2010).

Скорость глобального выброса микроорганизмов в атмосферу также была оценена путем определения скоростей, необходимых для обеспечения наблюдаемых концентраций в атмосфере. Основываясь на этих рассуждениях, результаты имитационных моделей предполагают, что частицы, содержащие бактерии, выбрасываемые с скоростью 10%.²⁴

из

бактериальных клеток) (Норы *et al.*, 2009a). Аналогичным образом, были оценены скорости выброса более крупных микробных частиц (диаметром от 9 до 60 мкм), но для конкретных регионов, а не в глобальном масштабе (Уилкинсон *et al.*, 2011). Оценки региональных выбросов грибов как функции типа землепользования также были сделаны на основе измерений атмосферных концентраций на различных высотах и общих предположений о циркуляции воздуха. Эти оценки предполагают, что скорости выброса варьируются от 8 спор грибов до⁻²

s⁻¹ над тундрой до 2500 над

сельскохозяйственные культуры (Сезартик и Даллафиор, 2011). Оценки глобальных выбросов грибковых спор также были сделаны с использованием маннита в качестве косвенного показателя. Грибосемянница составляет около 28 Тг в год. Микробные аэрозоли, и около 7% этой фракции представляют собой споры грибов (Heald and Spracklen, 2009).

16.3 Перенос в пограничном слое Земли

16.3.1 Двигатели транспорта

За исключением некоторых грибов, которые могут выбрасывать свои споры в воздух, как описано в предыдущем разделе, микроорганизмы не имеют собственных средств передвижения. Именно движение молекул воздуха увлекает микробные частицы, если только эти частицы не обладают аэродинамическими свойствами, позволяющими силам тяжести преодолеть это увлечение. В пограничном слое земли текучесть воздуха в значительной степени зависит от местной топографии и климата. Местный микроклимат является результатом взаимодействия между атмосферой и поверхностными свойствами растительного покрова (тип растений и структура полога, орошение, обилие голой почвы и т.д.). Эти взаимодействия приводят к локальным колебаниям температуры, относительной влажности и скорости ветра вблизи растительного покрова. Топографические особенности, такие как живые изгороди и горы, действуют как ветровые барьеры. Влияние растительного покрова и рельефа местности на изменения в движении воздуха усугубляется температурой окружающей среды и падающей радиацией, которые имеют сезонные и суточные циклы. Из-за сложности и изменчивости движений воздуха в пограничном слое планеты, способность предсказывать траектории частиц сильно зависит от точных прямых измерений приповерхностных явлений.

Несмотря на небольшой размер микроорганизмов, на их перенос в пограничном слое земли тем не менее влияет сила тяжести и, следовательно, их аэродинамические свойства. Важным аэродинамическим свойством является их конечная скорость: скорость, с которой они падают в неподвижном воздухе в результате уравнивания силы тяжести и сопротивления воздуха (Лейси и Уэст, 2006). Другим является аэродинамический диаметр: диаметр, который потребовался бы частице для достижения своей конечной скорости, если бы она была идеальной сферой с плотностью 1 г см^{-3} .

Аэродинамические свойства микроорганизмов приблизительно зависят от их размера и массы, при этом более крупные и тяжелые частицы, такие как споры грибов, имеют большую склонность к воздействию силы тяжести, чем более мелкие частицы, такие как бактериальные клетки. Однако было сообщено, что невозможно точно оценить аэродинамические свойства, и в частности аэродинамический диаметр, исключительно на основе физического диаметра (Reponen *et al.*, 2001). Плотность споры и другие микробных частиц является важным компонентом aerody-термодинамические диаметр, но это варьируется широко, и независимо от размера частиц. Неправильная, несферическая форма частицы также может усугубить трудность при оценке аэродинамического диаметра. Но на самом деле было предпринято мало усилий для измерения истинных аэродинамических свойств микробных частиц, таких как конечная скорость или аэродинамический диаметр..... Конечная скорость распространения уредоспор, формы спор, образуемых ржавчинными грибами, которая наиболее часто распространяется через атмосферу, находится в диапазоне $1\text{-}5 \text{ см / с}^{-1}$

(Li *et al.*,

2009). Это сравнимо с предельными скоростями широкого спектра грибковых спор, которые, по словам Грегори, находятся в диапазоне $0,3\text{-}1,4 \text{ см/с}^{-1}$ (Грегори, 1961). Некоторые грибковые споры имеют особенности поверхности, повышающие плавучесть (например, шипы, которые служат чем-то вроде крыльев),

это приводит к замечательной способности оставаться в воздухе, превосходящей способность других спор аналогичного физического диаметра (Стакман и Кристенсен, 1946). В целом, микробные частицы настолько малы, что воздействие силы тяжести часто маскируется воздействием движения воздуха, что приводит к длительному пребыванию в атмосфере - порядка 2-15 дней (Норы *et al.*, 2009a).

Помимо силы тяжести, в атмосфере преобладают два явления, которые увлекают микробные частицы, приводя к их движению вверх или вниз: тепловые конвекционные ячейки и турбулентные вихри. Конвекционные ячейки возникают при нагревании определенного объема воздуха. Воздух расширяется, становится менее плотным, чем окружающий воздух, и таким образом поднимается; когда он охлаждается, он становится плотнее и опускается. То же самое происходит, когда вода нагревается в кастрюле: она начинает двигаться в результате разницы температур между дном и верхом. Поскольку поверхность земли нагревается падающим солнечным излучением, тепло отводится в атмосферу, что приводит к перепаду температур. Это приводит к конвекции, перемещающей тепло вверх, в атмосферу. Ощутимое тепло - это количество обмениваемой таким образом энергии, которая играет важную роль в потоке микробных и других частиц в атмосфере. Турбулентные вихри - это закручивающиеся и обратные потоки, возникающие, когда воздушные потоки наталкиваются на препятствие. Препятствием может быть физический объект, трение между шероховатостью поверхности ландшафта и движущимся воздухом (ветром) или разница в давлении воздуха.

16.3.2 Количественная оценка приповерхностного потока

Поток микробных частиц в планетарном пограничном слое называется "приповерхностным потоком" и касается, по существу, вертикального перемещения. Количественные измерения потока необходимы для определения чистого направления этого движения, что позволяет идентифицировать эффективные источники микробных аэрозолей и их силу. Эти меры также полезны при прогнозировании траекторий и предназначения этих аэрозолей, предоставляя данные для параметризации моделей мезомасштабного рассеивания (от десятков метров до нескольких километров) или моделей распространения на большие расстояния (от десятков до тысяч километров). Присутствие микроорганизмов в атмосфере и сравнение их относительной численности в разное время, в разных географических точках и над разными типами почвенного покрова оценивались во всей аэриобиологической литературе почти исключительно с точки зрения концентрации микроорганизмов в данном объеме воздуха (Jones and Harrison, 2004; Burrows *et al.*, 2009b; Bayzars *et al.*, 2011). Хотя эти оценки полезны для описания разнообразия микроорганизмов в атмосфере, такие показатели представляют собой всего лишь моментальные снимки постоянного движения этих организмов, их непрерывных перемещений, прибытия и отбытия. Концентрации микроорганизмов в атмосфере могут быстро колебаться в результате периодических изменений атмосферных транспортных барьеров (Таллапрагада, Росс и Шмале, 2011).

Поток частиц (также называемый "плотностью потока") - это количество частиц, проходящих через единицу площади за единицу времени (количество частиц m^{-2}). Поток аналогичен концентрации, умноженной на скорость (количество частиц $m^{-3} \times m s^{-1} =$ количество частиц $m^{-2} s^{-1}$).

). Это можно наглядно представить, представив автомобили на шоссе: интенсивность движения обычно выражается как количество транспортных средств, проезжающих виртуальный барьер в единицу времени. Это поток. Моментальный снимок автомобилей на дороге в любой момент времени не скажет нам, движется ли транспорт и в каком направлении, но это так.

предоставьте нам информацию о концентрации автомобилей различных марок на дороге. Такой моментальный снимок не может отличить вторжение в город от массового исхода; он также не может отличить плотное движение транспорта от парковки.

Есть только два отчета измерения приповерхностного потока микроорганизмов *ganisms* в атмосфере (Линдемманн *et al.*, 1982; Лайтхарт и Шаффер, 1994). Это находится в противоречии с заметным развитием измерения потока газов, и в частности загрязняющих веществ и парниковых газов, таких как O_3 и CO_2 , с целью характеристики выбросов и их источники. Большинство методов, применяемых в настоящее время для измерения потока газа, основанных на расчете вихревой ковариации, включают высокочастотные измерения (порядка 5-20 Гц; то есть 5-20 измерений в секунду) концентраций газа и микрометеорологических параметров, включая скорость ветра и температуру (Лэнгфорд *et al.*, 2009). Эти методы могут быть применены к газам, присутствующим в атмосфере в достаточно высоких концентрациях, чтобы их можно было обнаружить в небольших объемах воздуха, которые собираются за эти короткие промежутки времени. Однако для редких газов и других аэрозолей (таких как определенные летучие органические соединения, различные стабильные изотопы, пестициды, пыльца и микробные аэрозоли) пробы воздуха, собранные при таких высоких частотах, как правило, не содержат целевого химического вещества или частицы. Следовательно, методы, обычно используемые для измерения потока обильных газов, не могут быть использованы для микроорганизмов, редких газов или других редких частиц. Таким образом, исследования атмосферного потока редких химических веществ и частиц, как правило, проводились намного медленнее, чем для распространенных газов.

В двух сообщенных попытках измерить микробный поток в атмосфере (Lindemann *et al.*, 1982; Лайтхарт и Шаффер, 1994) применили градиентный метод, основанный на микрометеорологических измерениях концентрации бактерий на двух высотах. В полевых установках использовалась вертикальная конструкция высотой в несколько метров, на которой были установлены пробоотборники воздуха и метеорологическое оборудование для получения данных о плотности воздуха, температуре на двух высотах и скорости ветра (Lindemann *et al.*, 1982) и для температуры и ощутимого теплового потока (Лайтхарт и Шаффер, 1994), в дополнение к концентрациям микробных популяций. Расчеты потока на основе этих измерений включали вычисление разницы в концентрации микроорганизмов на двух высотах в сочетании с оценками атмосферного потока условий между двумя высотами на основе метеорологических данных. Эти последние оценки основаны на некоторых очень сильных предположениях об атмосферном теплопередаче, которые относятся к очень специфическим ландшафтным условиям, где имеется достаточный приток; то есть там, где движению воздуха в окрестностях в достаточной степени не мешают топографические особенности (в частности, плоские, открытые районы).

Для измерения потока частиц и разреженных газов был разработан альтернативный микрометеорологический подход. Накопление ослабленных вихрей (REA) представляет собой условный отбор проб методом, при котором пробы воздуха выборочно направляются в резервуары с восходящей или нисходящей тягой в соответствии с суммарным направлением вертикальной скорости ветра во время отбора проб (Businger and Oncley, 1990). Он использовался для изучения различных атмосферных компонентов, включая стабильные изотопы (Боулинг, Танс и Монсон, 2001), ртуть (Олофссон *et al.*, 2005), галогенуглероды (Хорнсби *et al.*, 2009), и аэрозоли в целом (Гаман *et al.*, 2004; Проведен *et al.*, 2008). Воздух из каждого резервуара впоследствии анализируется, и поток рассчитывается исходя из разницы в концентрации между двумя резервуарами.

Предпринимаются усилия по разработке систем РЭА, адаптированных к измерению потока микроорганизмов. Основная задача этой работы, скорее всего, будет заключаться в ее адаптации к

пробоотборники с достаточной производительностью для обнаружения микроорганизмов, которые обычно присутствуют в концентрациях от десятков до тысяч частиц на кубический метр воздуха. Во-первых, измерение потока требует активного улавливания частиц при известном расходе воздуха и, следовательно, не приспособлено для использования пассивных улавливателей. Пассивные ловушки, такие как открытые чашки Петри, содержащие агаровую среду, полезны для измерения скорости осаждения (количества частиц, падающих на данную поверхность в единицу времени), но не могут использоваться для измерения концентраций (см., например, обзор Сесартика и Даллафиора, 2011). В активных пробоотборниках частицы захватываются потоком воздуха и втягиваются в пробоотборник и в конечном итоге захватываются при ударе о твердую поверхность (например, агаровую среду или фильтр), попадают в жидкость или захватываются циклоном с закручивающейся жидкостью. Эти типы пробоотборников описаны в таблице 16.1. В имеющихся в настоящее время активных пробоотборниках, приспособленных для извлечения микробных частиц, скорость потока составляет менее $1 \text{ м}^3 \text{ мин}^{-1}$. Существуют также значительные различия в эффективности пробоотборников с точки зрения их способности улавливать мелкие частицы. Предельный размер пробоотборника определяется как размер частиц, ниже которого он собирает менее 50% доступных частиц. Чем выше размер отсечки, тем ниже ее эффективность при сборе мелких частиц. Размер отсечки пробоотборника зависит от таких характеристик, как диаметр сопла и скорость струи, проходящей через него. В исследовании семи импакторов Яо и Майнелис (2006) пришли к выводу, что большинство тестируемых пробоотборников биоаэрозоля существенно занижали концентрацию бактерий, особенно для отдельных бактериальных клеток диаметром 0,5-1,0 мкм. С другой стороны, большинство пробоотборников оказались достаточно эффективными для сбора более крупных спор грибов.

Эффективность отбора проб также зависит от скорости наружного воздуха. Баланс между скоростью наружного воздуха и скоростью внутренней струи может повлиять на эффективность сбора. В идеале скорость воздуха, поступающего в сопло, должна быть равна местной скорости ветра (изокинетический отбор проб - см., например, обзор Сесартика и Даллафиора, 2011). При анизокинетическом отборе проб может наблюдаться избыточный или недостаточный сбор частиц, в зависимости от их размера (Николсон, 1995). Эффективность также связана с биологическими характеристиками микроорганизмов. Во время отбора проб микроорганизмы могут потерять жизнеспособность в результате механического воздействия (сдавливания) и обезвоживания (сбора через фильтр). Если количественная оценка достигается за счет роста микроорганизмов на синтетической питательной среде, клетки, которые не могут вырасти в колонии на среде, не будут приниматься во внимание.

Приповерхностный поток описывает чистое вертикальное перемещение частиц в атмосфере. Горизонтальное движение также происходит в пограничном слое земли. Изучение распространения различных патогенов растений на относительно короткие расстояния (мезомасштабное распространение) (например, внутри возделываемых полей и между ними) было одной из основных проблем патологии растений. Типичная тенденция экспоненциального снижения плотности спор из предполагаемого источника и возникновения сопутствующих заболеваний была описана для многих патогенов растений (Gregory, 1961; Zadocks and Bosch, 1994). Более поздние работы были описаны конкретные атмосферном барьеры для мезомасштабных разгон (Шмалил *et al.*, 2012). Как правило, мезомасштабное рассеяние происходит в планетарном пограничном слое. С другой стороны, рассеяние на большие расстояния (LDD) более сложно оценить, и оно может происходить как в пограничном слое планеты, так и за его пределами, в свободной тропосфере.

16.4 Перенос на большие расстояния: из пограничного слоя в Свободную тропосферу

Перенос микроорганизмов на большие расстояния является важной проблемой, учитывая их длительное пребывание в атмосфере. Время пребывания бактерий (частиц диаметром 1-3 мкм) было оценено как 1-2 недели, если они активны в виде CCN или IN (что приводит к их секвестрации). Если они не удаляются из атмосферы, время их пребывания может составлять 100 дней или более (Норы *et al.*, 2009a). Для более крупных микробных частиц (9-60 мкм в диаметре), время пребывания, вероятно, составляет порядка от нескольких дней до 2 недель, в зависимости от места и условий выброса (Уилкинсон *et al.*, 2011). Воздушные массы могут пересекать океаны и континенты за несколько дней, поэтому такое время пребывания предполагает возможность их перемещения по планете на большие расстояния.

16.4.1 Масштаб горизонтальных перевозок на большие расстояния

Перевозки на большие расстояния были определены в терминах горизонтального перемещения. Для растительных патогенов это обычно называется "распространением на большие расстояния" и определяется как перенос жизнеспособных форм патогена, способных вызывать инфекцию, на расстояние 1000 км или более от источника (Нагараджан и Сингх, 1990). Знание идентичности и локализации источника является неотъемлемой частью этого определения. Однако следует отметить, что термин "распределение" часто используется, несмотря на отсутствие знаний об источнике.

Было зарегистрировано

много случаев LDD микроорганизмов на континентах или по всей планете (Brown and Hovmöller, 2002). В отличие от пылевых шлейфов, таких как те, которые спутников после мощной пыльной бури, пожара или извержения вулкана (Флентье *et al.*, 2010), микробные аэрозоли нелегко визуализировать и отследить из интенсивного, четко определенного источника. Поскольку практически невозможно точно пометить микроорганизмы в предполагаемом источнике, LDD никогда не измеряется напрямую. Подтверждение данных о LDD включает использование аналитических методов, основанных на популяционной генетике, моделировании траекторий движения воздушных масс, и дистанционным зондированием.

Грибы, и ржавчина в частности, были основной моделью для изучения LDD. Ржавчинные облигатными биотрофами, которые не способны расти на синтетических микробиоценозах, для своего развития требуют определенных растений-хозяев. Ранний прогресс в изучении распространения этих грибов был основан на отличительной морфологии их спор - также способствует их аэродинамической плавучести и склонности к полету. Только спектр ржавчинных грибов и конкретных природно-климатических условий, необходимых для эпидемиями СОП- облегчает они вызывают были также полезны при определении источников. Благодаря сочетанию наземных съемок с анализом погоды и климата, а также с дистанционным зондированием, в 1970-х годах были выявлены два важных трансатлантических явления ржавчины (Nagarajan and Singh, 1990): споры *Hemileia vastatrix*, возбудитель кофе-бурая ржавчина, несколько подопоз

Рид из Республики Ангола Бразилия и споры *Предполагается, что Puccinia melanocephala*,

возбудитель ржавчины сахарного тростника, был перевезен из Камеруна в

Доминиканскую Республику. В обоих случаях не было официально доказано, что

перенос на большие расстояния происходил в атмосфере, но предположение основано на анализе подробных

метеорологических данных (Brown and Hovmöller, 2002). Появление молекулярных методов,

подтверждающих родство микроорганизмов в отдельных образцах, обеспечило дополнительные возможности

доказательства для LDD. Например, результаты классических эпидемиологических исследований показали, что споры *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, грибок, вызывающий желтую ржавчину на пшенице, часто мигрирует в Северо-Западной Европе между Великобританией, Германией, Францией и Данией. Дактилоскопия с усиленным полиморфизмом длины фрагмента (AFLP) показала, что единственная клональная популяция присутствовала в четырех странах на расстоянии до 1700 км друг от друга. В пяти случаях клоны специфического патогена были распространены между Великобританией и Данией, и по крайней мере в двух случаях клоны также были распространены из Великобритании в Германию и Францию (Hovmøller, Justesen, and Brown, 2002).

LDD также может быть выведен на основе моделирования траекторий движения воздушных масс между предполагаемыми источниками микроорганизмов и интересующими пунктами назначения. Наиболее широко используемой моделью для аэробно-биологических приложений является гибридная одночастичная интегрированная траектория Лагранжа (HYS-PLIT) (NOAA ARL; <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). Ретротраектории воздушных масс могут дать представление о потенциальных источниках аэрозолей. На основе траекторий, рассчитанных с помощью HYSPLIT, Prospero *et al.* (2005) сообщили о межполушарном переносе жизнеспособных грибов и бактерий из Африки в Карибский бассейн с почвенной пылью. Связывая траектории движения воздушных масс с молекулярными данными о сходстве популяций в предполагаемом источнике и в пункте назначения, *Нан* (2011) показали, что пыльные бури в пустынях Такла-Макан и Гоби по всему Китаю повлияли на бактериальное сообщество, переносимое воздушно-капельным путем, в Сеуле, Южная Корея, с точки зрения концентрации культивируемых бактерий, генетической структуры и разнообразия. Полученные результаты свидетельствуют о том, что азиатская пыльная буря может переносить бактерии, связанные с пылью пустыни, на расстояние нескольких тысяч километров.

16.4.2 Высота переноса на большие расстояния

Хотя микроорганизмы непосредственно наблюдались в свободной тропосфере и стратосфере (Имшенецкий *et al.*, 1978; Уэйнрайт *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2008) - выше высоты облаков - как и в пограничном слое планеты, высота, на которой происходит LDD, обычно определяется на основе данных об атмосферной циркуляции. Например, чтобы объяснить жизнеспособность грибов и бактерий, связанных с пылью африканских пустынь и собранных на Барбадосе, Просперо *et al.* (2005) предположили, что значительная часть переноса должна происходить в пограничном слое планеты (ниже высоты облаков). На таких высотах относительная влажность выше, чем выше высоты облаков, что сводит к минимуму последствия обесцвечивания. Напротив, воздушные массы, прибывающие на Барбадос из Северной Атлантики, часто опускаются из средней тропосферы, где температура и относительная влажность могут быть очень низкими, а интенсивность ультрафиолета (УФ) очень высокой - факторы, которые могут убивать микроорганизмы. Эти гипотезы, основанные на различном происхождении воздуха, были подтверждены микробной жизнеспособностью, обнаруженной в их образцах. Аэродинамические свойства спор азиатской ржавчины сои (*Phakopsora pachyrhizi*) также были использованы для предположения о переносе в свободной тропосфере. При транспортировке в планетарном пограничном слое споры этого гриба обычно сталкиваются с условиями, которые приводят к быстрому отложению их в осадок (Krupa *et al.*, 2006), что означает, что они вряд ли смогут преодолевать большие расстояния, если их не перевезти на более высокие высоты. В исследовании Krupa *et al.* (2006) в отношении распространения ржавчины азиатской сои с юга Техаса и полуострова Юкатан на Средний запад Соединенных Штатов эти авторы выявили вертикальные движения воздуха, которые указывали на вентиляцию пограничного слоя в подветренных областях, предполагая возможную инъекцию уредоспор в свободную тропосферу, где они могли переноситься на большие расстояния, прежде чем осесть влажным или сухим осаждением.

16.5 Взаимодействие микробных аэрозолей с атмосферными процессами

Микробные клетки обладают поверхностными и метаболическими свойствами, которые придают им способность взаимодействовать с физическими и химическими процессами в атмосфере. Две из их потенциальных ролей в атмосферных процессах включают воздействие на радиационное воздействие через рассеяние света и поглощение (Jaenicke, 2005) и влияние на конденсацию через их действие в качестве CCN (Ariya and Amyot, 2004). Они изучались не так интенсивно, как другие предполагаемые роли:

способность микроорганизмов изменять химический состав облаков и вызывать оледенение облаков и, таким образом, вызывать выпадение осадков. Из-за относительно низкого содержания микробных аэрозолей по сравнению с минеральными и небиологическими аэрозолями в атмосфере, их влияние на охлаждение атмосферы и другие последствия радиационного воздействия, вероятно, будут незначительными и не будут здесь дополнительно обсуждаться. Широкий спектр частиц в атмосфере может действовать как CCN, способствуя конденсации атмосферного водяного пара на их поверхностях, что является ключевым этапом формирования облаков. Хотя химические свойства поверхности частиц критичны для активности CCN, размер частиц оказывает преобладающее влияние на эффективность CCN выше определенных размеров. Частицы диаметром 1 мкм и более входят в диапазон размеров, которые высокоэффективно вызывают конденсацию, причем размер в этом отношении более важен, чем химический состав поверхности (Dusek *et al.*, 2006). Таким образом, представляется вероятным, что бактериальные, грибковые и водорослевые клетки сами по себе будут хорошими CCN, даже если их может быть не так много, как небиологические CCN. Després *et al.* (2012) обобщил имеющиеся данные о гигро-ловленной рост бактерий, споры грибов, пыльца растений и водорослей, которые подтверждают возможности микробиологических частиц конденсироваться и скапливаться воде на их поверхности, но показывают, что это не конкурент потенциала атмосферного гигроскопических солей.

Проводились интенсивные исследования способности микроорганизмов, и бактерий в частности, вносить свой вклад в окислительные реакции и другие преобразования органических соединений в атмосфере (Delort *et al.*, 2010). Эти реакции особенно важны в подкислении атмосферы, в последующем образовании вторичных аэрозолей, и в их последующем воздействии на климат, качество воздуха и геохимические циклы. Основная часть химических реакций, происходящих в атмосфере, обусловлена фотохимией и позволяет преобразовывать химические вещества в сухой суспензии. Однако фотохимические реакции останавливаются ночью. Кроме того, влажные условия облачных капель позволили бы действовать микробным ферментам. Следовательно, при определенных условиях (в облаках ночью) метаболическая активность микроорганизмов, взвешенных во влажных частицах аэрозоля, обладает каталитическим потенциалом, аналогичным фотохимическому (Delort *et al.*, 2010). Кроме того, как мы указывали в предыдущей работе (Моррис *et al.*, 2011), вполне вероятно, что микробные клетки также участвуют в неметаболической химической модификации химического состава атмосферы. Молекулы могут десорбироваться с биологических поверхностей (Cote, Kos, and Ariya, 2008), химические вещества могут высвобождаться во время лизиса клеток, и клетки могут участвовать, например, в процессах столкновения-коалесценции.

Способность микроорганизмов катализировать замерзание облачных капель привлекла на сегодняшний день наибольшее внимание из всех типов взаимодействия, которые микробные клетки могут осуществлять с атмосферой. Температура самопроизвольного замерзания чистой воды составляет около -37°C (Мюррей *et al.*, 2010). При температурах ниже 0°C , но выше температуры самопроизвольного замерзания, вода не замерзает до тех пор, пока катализатор не поможет ей преодолеть термодинамические барьеры для перехода из метастабильной переохлажденной жидкой фазы в твердую фазу. Широкий спектр частиц, естественно присутствующих в атмосфере, может катализировать замерзание при температурах, более высоких, чем температура самопроизвольного замерзания воды (Моссон, 1963);

Ширмер и Завадский, 1997). Но при отсутствии достаточного количества IN, активного при температуре облака, облачные капли способны сильно охлаждаться даже при приближении облаков. - рабочая температура -37°C . Если капли в облаках в средних широтах не замерзнут, они могут оставаться взвешенными, поскольку нет эффективных средств для их объединения в более крупные, более тяжелые частицы льда размером с осадки, способные падать на землю в виде дождя или снега. При некоторых условиях, таких как сильные ливни и тропические штормы, достаточно крупные облачные капли могут эффективно сталкиваться и сливаться, образуя дождевые капли непосредственно в жидкой фазе. В этих случаях замерзание не является критическим этапом в образовании дождя. Поскольку в облаках (песках) были обнаружены микроорганизмы, обладающие активностью к образованию зародышей льда. *et al.*, 1982; Amato *et al.*, 2005; Аттарад *et al.*, 2012), а также потому, что они обладают потенциалом катализировать образование льда при относительно теплых температурах, когда основная часть инертной атмосферы находится в бессильной (при температурах выше -10°C) (Ширмер и Завадски, 1997; Моррис, Георгакапулос и Сэндс, 2004; Денпре *et al.*, 2012), легко понять, что существует значительный ажиотаж вокруг потенциальной роли биологических нуклеаторов льда в этом процессе.

окно, при котором минимальная температура облачности не опускается ниже -10°C .

Реальная способность атмосферных микроорганизмов влиять на количество осадков была выведена из только что описанных процессов и явлений. Это рассуждение было дополнительно подкреплено экспериментальными данными, показывающими, что заселение облаков активными для зарождения льда бактериями может привести к их оледенению, как для облаков, созданных в лабораторных камерах (Мелер *et al.*, 2008) и для естественных облаков (Уорд и Демогг, 1989). Эти результаты явно подтверждают гипотезу о том, что микроорганизмы, активные в образовании зародышей льда, могут вызывать замерзание облачных капель воды в условиях, типичных для облаков средних широт. В этих условиях замерзание капель является необходимым условием для их накопления в капли достаточного размера, чтобы выпасть из облаков в виде осадков. Однако кристаллы льда в облаках также необходимы для запуска процесса, необходимого для образования молнии. В недавней работе было применено региональное атмосферное моделирование для оценки влияния бактерий, активных к зарождению льда, на электризацию облаков и общее количество вспышек молний (Гонсалвес *et al.*, 2011). Эта работа предполагает, что при определенных условиях присутствие бактерий, активных к зарождению льда, в облаках приводит к уменьшению количества осадков, но увеличению образования льда, что впоследствии способствует увеличению числа вспышек молний.

16.6 Значение воздушного переноса для эволюционной истории микроорганизмов

Оценка важности воздушного транспорта для местообитаний, в которые проникают переносимые по воздуху микроорганизмы, или для здоровья растений и животных, страдающих от болезней, которые они вызывают, является важной задачей эпидемиологии. Обратный вопрос - то, каким образом распространение по воздуху влияет на эволюционную историю самих микроорганизмов, - также является фундаментальной проблемой, которой уделяется повышенное внимание. Разумно предположить, что микроорганизмы, способные выживать в кажущихся стрессовыми условиях интенсивного воздействия ультрафиолета, сушки и довольно низких температур, будут обладать признаками, отражающими биологическую адаптацию к ним. Однако способность выживать в этих условиях является частью сложной биологии микроорганизмов, которые размножаются в средах, сильно отличающихся от экстремальных атмосферных условий. В результате уравнивания различных аспектов жизнедеятельности микроорганизма, вероятно, функциональные особенности, которые приводят к их

показатели выживаемости намного сложнее, чем те, которые можно измерить, например, с помощью прямых тестов на высыхание или устойчивость к ультрафиолетовому излучению. Мы ожидаем, что геномный и метаболомный анализ микроорганизмов - подходы, которые объединяют разрозненные функции в клеточной биологии этих организмов, - обеспечат новое понимание, которое может вывести наше понимание за рамки текущей, несколько фрагментарной перспективы. Тем не менее, в следующем анализе того, как аэробиология влияет на эволюцию микроорганизмов, мы будем опираться на данные, доступные в настоящее время.

Облигатная биотрофия - это признак, который, вероятно, имеет важную связь с расселением по воздуху. Облигатно биотрофные организмы нуждаются в живом хозяине, чтобы размножаться; они не могут выживать на мертвых материалах. Следовательно, такие организмы должны быть уверены в том, что найдут своих хозяев, либо привязавшись к ним (как в случае с некоторыми паразитическими растениями), либо будучи способными расселиться в достаточной степени, чтобы встретить их по всему своему экологическому ареалу. Перемещение критически важно для облигатно биотрофных грибов (таких как те, которые вызывают ржавчину, мучнистую росу и некоторые виды ложной мучнистой росы), которые поражают однолетние растения или такие растения, как лиственные деревья, восприимчивые ткани которых имеют годовые циклы. Некоторые из этих грибов продуцируют зимующие споры, но споры, находящиеся в воздухе, преобладают в их жизненном цикле. Табачная синяя плесень, вызываемая *Пероноспора табачная*, распространяется на север в США в течение вегетационного сезона вдоль фронта распространяющейся волны заболевания от самых южных до северных районов выращивания табака посредством производства спор, переносимых воздушно-капельным путем (Aylor, 2003). Прогрессирование стеблевой ржавчины пшеницы, вызываемой *Puccinia graminis*, от Мексики до Канады через то, что было названо Пшеничным поясом Северной Америки, также основано на сезонном повторном заносе спор в северные районы выращивания из южных широт (Aylor, 2003). Это лишь пара из множества примеров распространения облигатно биотрофных грибов.

Расширение посевов, произошедшее с момента появления сельского хозяйства с 10 000 до 5000 лет назад, и последующая гомогенизация генотипов растений (зерновых культур), которые покрывают поверхность земли, вероятно, усилили положительную природную способность таких грибов распространяться воздушным путем. Если бы было возможно идентифицировать конкретные генетические маркеры способности к распространению по воздуху, было бы интересно сравнить современные грибы ржавчины зерновых со следами тех, которые могут быть обнаружены в природных архивах, таких как керны льда. Однако в настоящее время мы можем только предполагать, исходя из скорости появления новых вирулентных рас ржавчинных грибов, что гомогенизация генетического ландшафта сельскохозяйственных культур усилила склонность к распространению по воздуху. Когда сопротивление ген внедряется в растения, если мутация вирулентности происходит в одной генетической линии возбудитель, который эффективно рассеивает с помощью команды LDD то ранее устойчивых сортов станет восприимчивым на больших территориях, где они выращиваются и возбудитель будет тем самым повысить его экологическую диапазону (коричневый и Novmøller, 2002). Подобное явление имело место для желтой листовой ржавчины пшеницы (*Puccinia striiformis*) в Северо-Западной Европе. В начале 1990-х годов ген устойчивости был широко внедрен в пшеницу для борьбы с этой ржавчиной. Первая вспышка ржавчины на пшенице, содержащей этот ген устойчивости, была зарегистрирована в Великобритании в 1994 году, с участием одного генотипа патогена. В 1997 году изоляты с этим генотипом были обнаружены в Дании и Франции, а год спустя они были обнаружены в Германии. В 1995 году в Англии был обнаружен другой вирулентный генотип, а 2 года спустя был обнаружен и он.

P. striiformis

в других местах Северо-Западной Европы, на участках на расстоянии до 1700 км друг от друга. Наиболее вероятным объяснением широкого распространения обоих вирулентных генотипов по Северо-Западной Европе является распространение спор ветром из Великобритании (Brown and Novmøller, 2002). Внедрение генов устойчивости к болезням в культурные растения считается решающим фактором в появлении новых патотипов микроорганизмов, которые разрабатывают средства для преодоления устойчивости. Однако вполне может быть, что широкое использование этих генов устойчивости также усиливает распространение по воздуху. Для того, чтобы оценить это влияние, было бы очень интересно определить, существует ли связь между аэродинамическими свойствами спор грибов биотрофного, например, и пространственное распределение своих хозяев, особенно среди возбудителей диких и широко культивируемых видов семейства злаки.

В случаях LDD, упомянутых ранее (ржавчина сахарного тростника и кофе), способность к перемещению в новые регионы, где находился хозяин, привела к очевидному появлению болезней там, где их раньше не наблюдали. Для облигатных биотрофов эта инвазивная способность потребовала бы, чтобы чувствительный вид-хозяин присутствовал в новом регионе или чтобы патоген обладал достаточной частотой мутаций, чтобы обеспечить появление вариантов, способных жить на вновь встреченных видах растений. Но для микроорганизмов, способных к сапрофитному росту (т.е. для большинства грибов и бактерий) или с большим диапазоном хозяев, способность к успешному размножению в новом регионе может быть достигнута за счет универсальности или полифагии. Растение патогенная бактерия *Pseudomonas syringae* по-видимому, это связано с круговоротом воды, поднимающейся в виде аэрозолей с поверхности растений в облака и осаждающейся со снегом и дождевыми осадками (Morris *et al.*, 2008). Удивительно, но генотип этой бактерии, обнаруженный в самом широком диапазоне субстратов окружающей среды, также обладает наибольшей универсальностью с точки зрения количества различных видов растений, которые она может поражать (Morris *et al.*, 2010). Это кажущийся парадокс, потому что можно было бы ожидать, что для того, чтобы быть специалистом широкого профиля, потребуется определенная физическая подготовка. Однако общая универсальность этой геномной группы *P. syringae* вероятно, из-за многофункциональных токсинов, на что указывает необычное изобилие генов для токсинов и дефицит факторов вирулентности, специфичных для хозяина, в этой группе по сравнению с таковыми в других генетических группах этой бактерии (Baltrus *et al.*, 2011). Другими словами, эта широко рассредоточенная группа *P. syringae* имеет несколько иную эволюционную историю, чем остальные геномные группы *P. syringae*, в том смысле, что он накопил меньше специфических факторов вирулентности и больше токсинов, чем другие группы, причем последние обеспечивают широкую адаптивность при относительно низких затратах. Связано ли это каким-либо образом с его рассеиванием в атмосфере? Следует отметить, что эта же генетическая группа у *P. syringae* также содержит наиболее эффективные ледяные нуклеаторы для этого вида в целом (Morris *et al.*, 2010). Кроме того, на основе измерений частоты встречаемости штаммов этой бактерии, активных для образования зародышей во льду, из ее различных субстратов и местообитаний было замечено, что осадки, особенно снег, обеспечивают наиболее сильный положительный отбор по активности образования зародышей во льду из всех изученных субстратов. Эти наблюдения привели к предположению, что активность образования зародышей льда, позволяющая бактерии вызывать образование льда и последующее выпадение осадков, является активной формой воздушного переноса, обеспечивающего отложение этой бактерии (Morris *et al.*, 2010). Если это так, то клетки, выпадающие в виде дождя или снегопада, будут откладываться в широком диапазоне условий окружающей среды. Следовательно, адаптивность была бы необходима для обеспечения выживания и размножения бактерий, пользующихся этим средством воздушного транспорта.

Ссылки

- Амато, П., Менагер, М., Санселме, М. *et al.* (2005) микробного населения в облаке воды
- Пуои-де-Дом: последствия для химии облаков. *Атмосферная среда*, **39**, 4143 -4153. Амато П., Паразолс
- М., Санселме М. *et al.* (2007) Микроорганизмы, выделенные из воды
- фаза тропосферных облаков в Пуои-де-Дом: основные группы и возможности роста при низких температурах. *Экология микробиологии FEMS*, **59**, 242 - 254. Ария, П.А. и Амиот, М. (2004) Новые направления: роль биоаэрозолей в атмосферном химия и физика. *Атмосферная среда*, **38**, 1231 - 1232.
- Аттард, Э., Янг, Х., Делорт, А.-М. *et al.* (2012) Влияние атмосферных условий на активность *Pseudomonas* по образованию *Химия и физика атмосферы*, **12**, ледяных зародышей. 10667 -10677.
- Эйлер, Д.Э.Н. (1990) Роль прерывистого ветра в распространении грибковых патогенов. *Ежегодный обзор фитопатологии*, **28**, 73-92.
- Эйлер, Д.Э. (2003) Распространение болезней растений в континентальном масштабе: роль распространения по воздуху патогены. *Экология*, **84**, 1989- 1997.
- Балтрус, Д.А., Нисимура, М.Т., Романчук, А. *et al.* (2011) Динамическая эволюция патогенности, выявленная с помощью секвенирования и сравнительной геномики 19 *Pseudomonas syringae* изоляты. *PLoS Патогены*, **7**, e1002132. Бауэрс
- Р.М., Маклетчи С., Найт Р. и Фиерер Н. (2011) Пространственная изменчивость воздуха-переносимые бактериальные сообщества в различных типах землепользования и их взаимосвязь с бактериальными сообществами потенциальных источников окружающей среды. *Журнал ISME*, **5**, 601-612. Боулинг Д.Р., Танс П.П. и Монсон Р.К. (2001) Распределение чистого углерода в экосистеме обмен с помощью изотопных потоков CO₂. *Биология глобальных изменений*, **7**, 127 - 145.
- Броуди, Э.Л., ДеСантис, Т.З., Паркер, Дж.П.М. *et al.* (2007) Городские аэрозоли содержат разнообразные и динамичные популяции бактерий. *Труды Национальной академии наук Соединенных Штатов Америки*, **104**, 299 - 304. Браун, Дж.К. и Ховмеллер, М.С. (2002) Воздушное распространение патогенов в глобальном и континентальном масштабах и его влияние на болезни растений. *Наука*, **297**, 537 - 541.
- Берроуз, С.М., Батлер, Т., Екель, П. *et al.* (2009a) Бактерии в глобальной атмосфере - Часть 2. моделирование выбросов и переноса между различными экосистемами. *Химия и физика атмосферы*, **9**, 9281-9297.
- Берроуз С.М., Элберт У., Лоуренс М.Г. и Пешль У. (2009b) Бактерии в глобальном атмосфера - часть 1: обзор и обобщение литературных данных по различным экосистемам. *Химия и физика атмосферы*, **9**, 9263-9280. Бусинджер Дж.А. и Онкли С. П. (1990) Измерение потока с помощью условного отбора проб. *Журнал атмосферных и океанических технологий*, **7**, 349-352.
- Капанна, Э. (1999) Лаццаро Спалланцани: у истоков современной биологии. *Журнал Экспериментальная зоология*, **285**, 178- 196.
- Черевик, У.Дж. (1953) Связь спорыньи с рыхлой головней пшеницы и ячменя. *Фитопатология*, **43**, 461- 463.
- Кот, В., Кос, Г. и Ария, П.А. (2008) Микробная трансформация и de novo дикарбоновых кислот тремя воздушно-капельными грибами: *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus flavus*, и *Penicillium chrysogenum*. *Наука об окружающей среде в целом*, **390**, 530-537.

- Делорт, А.-М., Вайтилинг, М., Амато, П. *et al.* (2010) Краткий обзор микробной популяции в облаках: потенциальная роль в химии атмосферы и процессах зарождения. *Атмосферные исследования*, **98**, 249- 260. Депре, В.Р., Хаффман, Дж.А., Берроуз, С.М. *et al.* (2012) Первичный биологический аэрозоль частицы в атмосфере: обзор. *Tellus*, lusb.v015564i015590.015598. , **B64** 015598. doi: 015510.013402/тел.-Дозрги,
- М.А. и Прис, Т.Ф. (1978) *Bacillus cereus* предотвращает прорастание уредоспор из *Russinia allii* и развитие ржавчинного заболевания лука-порея, *Allium porrum*, в контролируемых средах с троллингом. *Физиологическая Патология растений*, **12**, 123 - 132.
- Душек У., Франк Г.П., Хильдебрандт Л. *et al.* (2006) Размер имеет большее значение, чем химия для способность аэрозольных частиц к образованию облаков. *Наука*, **312**, 1375 - 1378.
- Элберт, У., Тейлор, П.Э., Андреае, М.О. и Пешл, У. (2007) Вклад грибов в первичные биогенные аэрозоли в атмосфере: влажные и сухие выброшенные споры, углеводы drates и неорганические ионы. *Химия и физика атмосферы.*, **7**, 4569 - 4588. Фишер, М.В.Ф., Штольбе-Рыбчинский, Дж.Л., Цуй, Ю. и Мани, Н.П. (2010) Насколько далеко и с какой скоростью могут разлетаться споры грибов? Физические ограничения на размер баллистоспор и расстояние выброса у базидиомикоты. *Биология грибов*, **114**, 669-675.
- Фитт, Б.Д.Л., Крейтон, Н.Ф. и Бейнбридж, А. (1985) Роль ветра и дождя в рассевании из *Botrytis fabae* конидии. *Труды Британского микологического общества*, **85**, 307-312.
- Флентье, Х., Клод, Х., Эльсте, Т. *et al* . (2010) Извержение Эйяфьятлайокудла в апреле 2010 - обнаружение вулканического шлейфа с использованием измерений на месте, зондов озона и профилей лидар-сейлометра. *Химия и физика атмосферы.*, **10**, 10085-10092. Френч, Р.С., Новотны, J.D. и Сирлз, Р.В. (1964) Свойства бактерий, выделенных из спор стеблевой ржавчины пшеницы. *Фитопатология*, **54**, 970 -973.
- Фрелих-Новоиски, Дж., Пикерсгилл, Д.А., Депре, В.Р. и Пешль, У. (2009) Хай-дайвер-роль грибов в твердых частицах воздуха. *Труды Национальной академии наук Соединенных Штатов Америки*, **106**, 12814 -12819. Фуэнтес, Э., Коу, Х., Грин, Д. *et al.* (2010) Первичный морской аэрозоль, полученный в лабораторных условиях аэрозоль путем разрыва пузырьков и распыления. *Методы измерения атмосферы.*, **3**, 141- 162. Гаман
- А., Ранник Ю., Аалто П. *et al.* (2004) Расслабленная система накопления вихрей для измерения потока аэрозольных частиц с разрешением по размеру. *Журнал атмосферных и океанических технологий* , **21**, 933 - 943. Гонсалвес, Ф.Л.Т., Мартинс, Дж.А., Альбрехт, Р.И. *et al.* (2011) Эффект бактериальных ледяных ядер о частоте и интенсивности молниевой активности, полученных с помощью модели БРАМСА. *Обсуждения химии и физики атмосферы.*, **11**, 26143-26171. Гурни Р.Л., Репонен Т., Гриншпун С.А. и Виллеке К. (2001) Источник силы веселья-аэролизация спор gal из заплесневелых строительных материалов. *Атмосферная среда*, **35**, 4853-4862.
- Грегори, П.Х. (1961) *Микробиология атмосферы* , Interscience Publishers, Inc., НЬЮ-ЙОРК.
- Пескарь, Э.У. (1929) I. Новые дожди из рыб. *Серия "Журнал естественной истории"*, **10**(3), 1-26.
- Харрисон Дж.Дж. и Лоу Р. (1987) Распространение ветром конидий *Botrytis* spp. патогенный для *Vicia faba*. *Патология растений*, **36**, 5 - 15.

- Хилл, К.Л. и Спраклен, Д. В. (2009) Атмосферный баланс первичных биологических аэрозольные частицы из спор грибов. *Письма о геофизических исследованиях*, **36**, L09806. doi: 09810.01029/02009GL037493. Хелд, А., Паттон, Э., Риццо, Л. *et al.* (2008) Моделирование ослабленного вихревого накопления потоков количества аэрозолей и потенциальных прокси-скаляров. *Метеорология пограничного слоя*, **129**, 451-468.
- Хорнби, К.Э., Флинн, М.Дж., Дорси, Дж.Р. *et al.* (2009) Ослабленное вихревое накопление (REA)-Система ГХ/МС для определения потоков галогенуглерода. *Методы атмосферных измерений*, **2**, 437-448. Novmøller, С. М., Юстесена, А. Ф., Браун, Джей К. М. (2002) Clonality и длинные дистанции миграция *Пуччиния полосовидная f.sp. tritici* в северо-западной Европе. *Патология растений*, **51**, 24- 32.
- Имшенецкий А.А., Лысенко С.В. и Казаков Г.А. (1978) Верхняя граница биосферы-*Прикладная микробиология и экология*, **35**, 1-5.
- Ингольд, К.Т. (1965) *Освобождение спор*, Clarendon Press, Оксфорд.
- Дженике, Р. (2005) Изобилие клеточного материала и белков в атмосфере. *Наука*, **308**, 73.
- Джарвис, У. Р. (1962) Распространение спор *Botrytis cinerea* о. на малиновой плантации. *Труды Британского микологического общества*, **45**, 549 -559.
- Чон, Э.М., Ким, Х.Дж., Юнг, К. *et al.* (2011) Воздействие пылевых явлений в Азии на переносимый воздух бактериальное сообщество, оцененное с помощью молекулярного анализа. *Атмосферная среда*, **45**, 4313-4321. Джонс А.М. и Харрисон Р.М. (2004) Влияние метеорологических факторов на концентрацию биоаэрозолей в атмосфере-сферический обзор. *Наука об окружающей среде в целом*, **326**, 151-180. Канаани Х., Харгривз М., Ристовски З. и Моравска Л. (2009) Фрагменты грибковых спор-формирование в зависимости от скорости воздушного потока и методов образования грибов. *Атмосферная среда*, **43**, 3725-3735.
- Крупа С., Бауэрсокс В., Клейбрук Р. *et al.* (2006) Интродукция спор ржавчины сои в Средний Запад Соединенных Штатов - тематическое исследование. *Болезни растений*, **90**, 1254-1259. Лейси, доктор медицинских наук и Уэст, Дж.У. (2006) *Воздушная спора*, Springer, Dordrecht. Лэнгфорд Б., Дэвисон Б., Немитц Э. и Хьюитт К.Н. (2009) Соотношения смешивания и вихревые измерения ковариационного потока летучих органических соединений в городском пологие (Манчестер, Великобритания). *Химия и физика атмосферы*, **9**, 1971-1987. Лич, С. (1987) Суточные электрические потенциалы листьев растений в естественных условиях. *Окружающая среда-Клиническая и экспериментальная ботаника*, **27**, 419 - 430.
- Лек, К. и Бигг, К. (2005) Биогенные частицы в поверхностном микрослое и перекрывающих его слоях атмосфера в центральной части Северного Ледовитого океана летом. *Теллус*, **57B**, 305-316.
- Ли, Дж.Х., Хван, Г.Б., Юнг, Дж.Х. *et al.* (2010) Характеристики образования грибковых спор и биоаэрозолей фрагментов путем регулирования воздушного потока над культурами грибов. *Научный журнал по аэрозолям*, **41**, 319-325.
- Ли Х., Янг Х., Мо Дж. и Го Т. (2009) Оценка термина уредоспоры ржавчины сои-конечная скорость, сухое осаждение и влажное осаждение, связанное с выпадением осадков. *Европейский журнал патологии растений*, **123**, 377-386.

- Лайтхарт Б. (1997) Экология бактерий в атмосфере на открытом воздухе. *FEMS Экология микробиологии*, **23**, 263- 274.
- Лайтхарт Б. (1999) Гипотеза, описывающая общее временное и пространственное распределение бактерий на открытом воздухе в приземном слое атмосферы Земли. *Атмосферная среда*, **33**, 611-615.
- Лайтхарт Б. и Шаффер Б.Т. (1994) Бактериальный поток из чапарала в атмосферу в середине лета в высокогорном пустынном районе. *Атмосферное окружение*, **28**, 1267-1274.
- Линдеманн Дж., Константиноидиу Х.А., Барше В.Р. и Аппер, С.Д. (1982) Растения как источник бактерий airborne, включая бактерии, активные для образования зародышей льда. *Прикладная и экологическая микробиология*, Махова, **44**, 1059-1063.
- Н., Уорд, Д.С., Клостер, С. *et al.* (2011) Воздействие аэрозолей на климат и биологические-геохимия. *Ежегодный обзор состояния окружающей среды и ресурсов*, **36**, 45 - 74.
- Маккартни, Х.А. (1991) Распространение патогенов растений воздушно-капельным путем. *Журнал прикладной микробиологии*, **70**, 49 -59.
- Меридит, Д.С. (1973) Значение механизмов высвобождения и распространения спор при болезнях растений-эпидемиология легкости. *Ежегодный обзор фитопатологии*, **11**, 313-342.
- Möhler, O., Georgakopoulos, D.G., Morris, C.E. *et al.* (2008) Неоднородное ядро льда-ионизирующая активность бактерий: новые лабораторные эксперименты в условиях моделируемой облачности. *Биогеологические науки*, **5**, 1425 - 1435. Моррис, С.Е., Джорджакапулос, Д. и Сэндс, округ Колумбия (2004) Бактерии, активные в зарождении льда и их потенциальная роль в выпадении осадков. *Journal de Physique Iv, France*, **121**, 87- 103. Моррис, К.Э.н., Сэндс, округ Колумбия, Бардин, М. *et al.* (2011) Специалист по микробиологии и атмосферным воздействиям-процессы: исследовательские задачи, касающиеся воздействия переносимых по воздуху микроорганизмов на атмосферу и климат. *Биогеонауки*, **8**, 17-25. Моррис, К.Э.н., Сэндс, округ Колумбия, Ваннесте, Дж.Л. *et al.* (2010) Выводят эволюционную историю патогена растений *Pseudomonas syringae* из его биогеографии в верховьях рек Северной Америки. *Европа и Новая Зеландия mBio*, **1**, e00107-10-20. Моррис, К.Э.н., Сэндс, округ Колумбия, Винатцер, Б.А. *et al.* (2008) История жизни патогена растений *Pseudomonas syringae* связан с круговоротом воды. *Журнал ISME*, **2**, 321 - 334.
- Моссоп, Южная Каролина (1963) Ядра атмосферного льда. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik*, **14**, 456- 486.
- Мюррей, Б.Дж., Бродли, С.Л., Уилсон, Т.В. *et al.* (2010) Кинетика гомогенных замоем-щей воды. *Физическая химия Химическая Физика*, **12**, 10380 -10387.
- Нагараджан С. и Сингх Д. В. (1990) Распространение возбудителей ржавчины на большие расстояния. *Ежегодный Обзор фитопатологии*, **28**, 139-153.
- Николсон, К.В. (1995) Физические аспекты отбора проб биоаэрозолей и их осаждения в книге *Справочник по биоаэрозолям* (ред. К.С. Кокс и К.М. Уэйте), CRC Press, Бока-Ратон, Флорида, стр. 27- 53. О'Дауд, К.Д. и де Леу, Г. (2007) Производство морских аэрозолей: обзор текущего знания. *Философские труды Королевского общества*, **365**, 2007-2043.
- Olofsson, M., Sommar, J., Ljungström, E. *et al.* (2005) Применение ослабленного вихревого контроля-методика расчета для количественной оценки потоков Hg0 над измененными поверхностями почвы. *Загрязнение воды, воздуха и почвы*, **167**, 331 - 352.

Pasteur, L. (1890) Mémoire sur les corpuscules organisés qui existent dans l'atmosphère.

Annales de Chimie et de Physique, **3**, 5 - 110.

Просперо Дж.М., Блейдс Э., Мэтисон Г. и Найду Р. (2005) Межполушарный перенос жизнеспособных грибов и бактерий от Африки до Карибского бассейна с почвенной пылью. *Аэриобиология*, **21**, 1- 19.

Репонен Т., Гриншпун С.А., Конвелл К.Л. *et al* (2001) Аэродинамика в сравнении с физиологией- минимальный размер спор: измерение и значение для осаждения из дыхательных путей. *Grana*, **40**, 119-125.

Сэндс, округ Колумбия, Лэнгханс, В.Э., Шарен, А.Л. и де Смет, Г. (1982) Ассоциация

связь между бактериями и дождем и возможные метеорологические последствия. *Журнал Венгерской метеорологической службы*, **86**, 148-152.

Шмале, Д.Г. III., Росс, С.Д., Феттерс, Т.Л. *et al.* (2012) Изоляты *Fusarium graminearum*

собранный на высоте 40-320 метров над уровнем земли, вызывает Фузариоз головокружение пшеницы и продуцирует трихотеценовые микотоксины. *Аэриобиология*, **28**, 1-11.

Сесартик А. и Даллафиор Т.Н. (2011) Глобальные выбросы спор грибов, обзор и обобщение

литературных данных. *Биогеологические науки*, **11**, 1181-1192.

Шарма, Н.К., Рай, А.К., Сингх, С. и Браун, Р.М. (2007) Водоросли, находящиеся в воздухе: их современное состояние актуальность. *Физиологический журнал*, **43**, 615 - 627.

Simon, X., Duquenne, P., Koehler, V. *et al.* (2011) Аэролизация *Escherichia coli*

и связанный с ним эндотоксин с использованием улучшенного генератора биоаэрозоля с барботажем. *Журнал Наука об аэрозолях*, **42**, 517-531.

Сивасубрамани С.К., Нимайер Р.Т., Репонен Т. и Гриншпун С.А. (2004) Споры грибов

тестер прочности источника: лабораторная оценка новой концепции. *Наука об окружающей среде в целом*, **329**, 75-86. Стакман

Э. и Кристенсен К.М. (1946) Аэриобиология в связи с болезнями растений. В

Ботаническом обзоре, **12**, 205- 253.

Стакман, Э.К., Генри, А.В., Карран, Г.К. и Кристофер, В.Н. (1923) Споры в

верхний воздух. *Журнал сельскохозяйственных исследований*, **24**, 599 - 606.

Ширмер В. и Завадский И. (1997) Биогенные и антропогенные источники образования льда

ядра: обзор. *Бюллетень Американского метеорологического общества*, **78**, 209- 228.

Таллапрагада, П., Росс, С.Д. и Шмале, Д.Г. III, (2011) Лагранжевы когерентные структуры

связаны с колебаниями популяций микроорганизмов, переносимых по воздуху. *Хаос: Междисциплинарный научный журнал по нелинейным наукам*, **21**, 033122. Уэйнрайт, М.,

Викрамсингхе, Северная Каролина, Нарликар, Дж.В. и Раджаратнам, П. (2003) Микроор-

организмы, культивированные из проб стратосферного воздуха, полученных на расстоянии 41 км. *Микробиология FEMS Письма*, **218**, 161-165.

Уорд, П.Дж. и Демотт, П.Дж. (1989) Предварительная экспериментальная оценка сноу Snomax

индуктор, *Pseudomonas syringae*, в качестве искусственного ледяного

ядра для изменения погоды. *Журнал изменения погоды*, **21**, 9- 13.

Уилкинсон Д.М., Кумутсарис С., Митчелл Э.А.Д. и Бей И. (2011) Моделирование

влияние размера на распространение микроорганизмов в воздухе. *Журнал биогеографии*, **39**, 89- 97. Вилоке,

Л., Беруд, Ф., Рай, Л. и Клержо, М. (1998) Воздействие ветра, относительная влажность-

степень, подвижность листьев и возраст колонии при распространении конидий *Uncinula necator*, возбудителя мучнистой росы винограда. *Патология растений*, **47**, 234-242.

- Янг Ю., Итахаси С., Йокобори С.-И. и Ямагиши А. (2008) Бактерии, устойчивые к ультрафиолетовому излучению, выделены из верхней тропосферы и нижней стратосферы. *Биологические науки в космосе.*, 22, 18-25. Яо М. и Майнелис Г. (2006) Исследование предельных размеров и эффективности сбора портативных микробных пробоотборников. *Наука и технология в области аэрозолей*, 40, 595 -606.
- Задокс, Дж.К. и Бош, Ф.В. (1994) О распространении болезней растений: теория очагов. *Ежегодный обзор фитопатологии*, 33, 503-521.

Дезинфекция микроорганизмов, переносимых воздушно-капельным путем Ультрафиолетовым излучением и Солнечным светом

Яна С. Кесаван и Хосе-Луис Сагрипанти

Химико-биологический центр Эджвуда, Абердинский испытательный полигон, США

17.1 Введение

Биаэрозоли представляют серьезную угрозу для здоровья человека из-за их потенциальной роли в передаче инфекционных заболеваний во время естественных эпидемий или после преднамеренного высвобождения биологических агентов в результате террористических актов или военных действий. Были проведены обширные исследования, направленные на понимание дезинфекции организмов, осевших на поверхностях, задержанных в воде и загрязняющих пищевые продукты, все из которых обсуждались в другом месте (Block, 2001). Напротив, дезинфекции микроорганизмов в аэрозолях уделялось гораздо меньше внимания, главным образом из-за трудностей, присущих проведению экспериментов. К организмам, переносимым воздушно-капельным путем, трудно попасть с жидкими дезинфицирующими средствами, которые обычно используются для обработки медицинских приборов, пищевых продуктов и питьевой воды. Следовательно, основным средством инактивации организма в аэрозолях является ультрафиолетовое (УФ) излучение.

Солнечное излучение используется в качестве дезинфицирующего средства для уничтожения организмов. Излучение с ≤ 290 нм длиной волны поглощается атмосферным озоном до того, как солнечный свет достигает поверхности земли; следовательно, более длинные ультрафиолетовые волны солнечного света обеспечивают основное бактерицидное действие в окружающей среде (Jagger, 1985; Giese, 1976; Литл и Сагрипанти, 2005). Бактерицидные ультрафиолетовые лампы относительно просты в использовании внутри помещений; следовательно, свет с длиной волны 254 нм часто используется для дезинфекции воздуха и поверхностей в медицинских и биомедицинских промышленных учреждениях.

Организмы, по-видимому, более восприимчивы к ультрафиолетовому излучению, когда они взвешены в воздухе (King, Kesavan, and Sagripanti, 2011). По этой причине выводы, сделанные на основе исследований организмов, находящихся в жидкостях или на поверхностях, как правило, не могут быть перенесены на организмы, находящиеся в аэрозоле. Эта повышенная восприимчивость, вероятно, является результатом сравнительно более легкого перемешивания на воздухе, в сочетании с более низкой скоростью поглощения ультрафиолета. Кроме того, сам процесс аэрозолизации может ослабить или повредить организм, тем самым делая его более восприимчивым к ультрафиолетовому облучению. Последствия обезвоживания и насыщения кислородом также могут способствовать повышению уязвимости микробов, переносимых воздушно-капельным путем.

В настоящем отчете представлены общие сведения и обзор ультрафиолетового излучения, отдельных организмов, представляющих потенциальный интерес для ученых и инженеров, занимающихся аэрозолями, и воздействия ультрафиолетового излучения на организмы, находящиеся в аэрозоле. Методология и оборудование для создания аэрозоля, а также методология испытаний, используемая в Эджвудском химико-биологическом центре армии США (ЕСВС), предоставлены исследователям в качестве примеров для сравнения с их собственными экспериментальными условиями и в качестве руководства для тех, кто новичок в этой области.

17.2 УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ излучение

Электромагнитное излучение представляет собой колебания электрических и магнитных полей в пространстве и классифицируется в соответствии с частотой этих колебаний как: радиоволны; микроволны; инфракрасные (ИК), видимые и ультрафиолетовые волны; рентгеновские лучи; и -лучи. Основной единицей электромагнитного излучения является фотон, который не имеет массы или электрического заряда и движется со скоростью света по волнообразной схеме. УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ излучение - это неионизирующее излучение, которое испускается атомами, когда их электроны переходят из более высоких энергетических состояний в более низкие, образуя фотоны определенной длины волны и диапазона энергий. Излучение УФ-излучения от лампы, заполненной газообразной ртутью, показано на рисунке 17.1. В этой системе два высоковольтных электрода помещены в камеру, заполненную ртутью. Дуга между электродами обеспечивает энергию, которая позволяет электронам атомов ртути переходить в состояние с более высокой энергией, и высвобождаются фотоны, когда эти электроны возвращаются в свои базовые низкоэнергетические состояния.

Область длин волн УФ-излучения находится между видимой и рентгеновской областями. Нижняя длина волны УФ-области составляет 10 нм, а верхний предел длины волны равен 380 нм (или 400 нм,

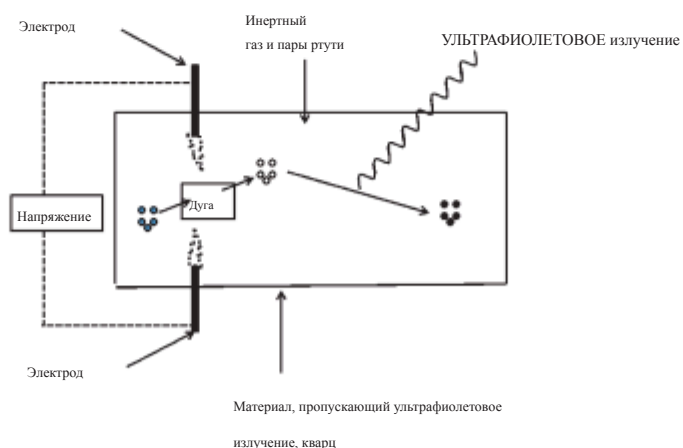


Рисунок 17.1

Выделение ультрафиолетового излучения.

Таблица 17.1 Диапазоны длин волн УФ-областей.

Область	Длина волны (нм)
Дальний	10-190
или вакуумный	190-290
УФ UV-C	290-320
UV-B UV-A	320-380

в зависимости от автора), который является началом диапазона, видимого человеческим глазом.

Как показано в таблице 17.1, спектр ультрафиолетового излучения разделен на четыре области: дальний УФ или вакуумный УФ, УФ-А, УФ-В и УФ-С. Эти области оказывают заметно различающееся воздействие на микроорганизмы. Дальнее ультрафиолетовое излучение ($\leq$ длина волны 190 нм) излучение солнца поглощается атмосферой и не достигает земли. По этой причине дальнее ультрафиолетовое излучение имеет незначительное отношение к инаktivации организмов в окружающей среде. Длины волн дальнего ультрафиолетового излучения очень вредны для всех форм жизни, но их трудно получить в лаборатории.

Точные границы между UV-A, UV-B и UV-C часто различаются у разных авторов и зависят от того, основано ли разделение на воздействие на здоровье или на физических принципах работы источников освещения. В целом, с точки зрения здравоохранения, длины волн UV-B и UV-C определяются как бактерицидные, в то время как излучение UV-A считается негермицидным. УФ-А излучение включает длины волн от 320 до 380 (или 400) нм и используется в лампах для загара. Излучение UV-B охватывает длины волн от 290 до 320 нм. Излучение UV-C содержит длины волн от 190 до 290 нм. Альтернативное определение Международной комиссии по освещению (Вена, Австрия) определяет УФ-В излучение как имеющее длину волны от 280 до 315 нм.

Наличие ртутных ламп низкого и среднего давления делает получение и использование УФ-излучения относительно простым и недорогим. Ртутные лампы низкого давления называются "монохроматическими", поскольку они излучают узкую полосу ультрафиолетового излучения на длине волны около 254 нм. Ртутные лампы среднего давления описываются как "полихроматические" и дают более широкий, но более плоский спектр, который простирается примерно от 200 до 400 нм.

На организмы воздействуют интенсивность ультрафиолетового излучения (поток) и время воздействия, и их умножение называется воздействием ультрафиолетового излучения (fluence). УФ-счетчики измеряют поток (в ваттах на квадратный метр), и это значение умножается на время экспозиции (секунды), чтобы получить поток (в джоулях на квадратный метр). В дополнение к прямому излучению солнца или ламп, также важно отражение от поверхностей и частиц в окружающей среде. Высоко отражающие среды, такие как белый песок и свежий снег, могут значительно увеличить ультрафиолетовое излучение в местах, затененных от прямого освещения, и, таким образом, эффективно дезинфицировать организмы (Бен-Давид и Сагрипанти, 2010).

17.3 Солнечный свет

Растущее внимание к эпидемиологии, биологической защите и общественному здравоохранению привело к тому, что все большее число ученых заинтересовалось оценкой обеззараживания организма с помощью воздействия солнечного света (Кухилл и Сагрипанти, 2009). Бактерицидное действие солнечной радиации известно уже много лет и было описано еще в 1878 году (Блэк и Витч

Корпорация, 2010). Роль солнечного света в эпидемиях среди людей была продемонстрирована увеличением числа госпитализаций с гриппом во время сезона пожаров в Бразилии, когда дым блокировал УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ облучение и снижал инактивацию вирусов в воздухе (Mims, 2005).

Известно, что солнечный свет убивает организмы, но проведение бактерицидных экспериментов с использованием прямых солнечных лучей является сложной задачей. Солнечный свет трудно контролировать, и риск случайного загрязнения образцов особенно высок на открытом воздухе.

На количество ультрафиолетового излучения, достигающего поверхности Земли, влияют многие факторы, включая широту, высоту, зенитный угол солнца (угол между солнцем и зенитом в течение дня), день года и погодные условия (Литл и Сагрипанти, 2005). Параметры окружающей среды, такие как общее содержание озона в столбе, присутствие облаков, загрязняющих веществ, пыли и аэрозолей, а также отражение от земли, также влияют на уровни радиации (Бен-Давид и Сагрипанти, 2010). Важно отметить, что атмосферный озоновый слой поглощает

излучение длин волн < 290 нм, полностью устраняющий бактерицидное УФ-С излучение и уменьшающий количество УФ-В излучения, которое достигает земли. Например, в регионах с меньшим содержанием атмосферного озона на землю достигает больше УФ-В излучения (Puskeppeleit

et al.

1992; Любин и Дженсен, 1995). Кроме того, количество УФ-В-излучения, которое достигает земли, больше на больших высотах, в низких широтах, в летние месяцы и достигает максимума в солнечный полдень.

Исследователи использовали множество методов для удаления участков солнечного спектра, чтобы позволить оценить воздействие УФ-А и УФ-В излучения как по отдельности, так и в сочетании. Например, однослойная пленка Saran (Dow Chemical Company, Мидленд, Мичиган) обеспечивает проникновение УФ-А и УФ-В излучения, но защищает образцы от загрязняющих веществ окружающей среды во время воздействия (Ризенман и Николсон, 2000). В том же исследовании использовалась стеклянная пластина толщиной 1,25 см, блокирующая УФ-В и пропускающая УФ-А излучение к образцам. В дополнение к естественному солнечному излучению в экспериментах также используется искусственное освещение, имитирующее солнечный свет. Воздействие искусственного света легче контролировать во время экспериментов, проводимых внутри лаборатории. Кроме того, ртутные дуговые лампы среднего давления, которые излучают УФ-спектр в диапазоне длин волн 280-320 нм (пик при 302 нм), можно использовать с фильтрами, которые блокируют длины волн ниже 290 нм для получения длин волн UV-B. и Николсон, 2000).

Многие исследователи измеряли дозы ультрафиолетового излучения, полученные в различных географических точках. Хейслер *et al.* (2004) измеряли дозу УФ-В в Балтиморе, штат Мэриленд, в течение 14-месячного периода. Когда их измерения сравнили с измерениями, проведенными на двух других объектах в Мэриленде, результаты показали, что дозы ультрафиолетового излучения были одинаковыми на трех объектах. Излучение UV-B было наибольшим в июне-июле (когда угол возвышения солнца также был самым высоким) и зависело от годового стратосферного цикла О. Результаты этого исследования показали, что среднегодовая суточная доза ультрафиолетового излучения составляла $35\,600 \text{ Дж/м}^2$. Максимальная суточная доза составляет $70\,000 \text{ Дж/м}^2$ наблюдалась летом и минимальная суточная доза $10\,000 \text{ Дж/м}^2$ зимой. В ясные дни, максимальная общая интенсивность ультрафиолетового излучения в Балтиморе колебалась в пределах около 3 Вт/м^2 (в июне) до $0,6 \text{ Вт/м}^2$ (в декабре).

Засос *et al.* (2008) изучали уровни радиации в разных частях страны. Приборы для измерения УФ-В-излучения, использованные в их исследовании, были разработаны таким образом, чтобы воспроизвести огненный спектр действия. Спектр эритемного действия - это параметр, который описывает относительную эффективность различных длин волн энергии в возникновении кожной реакции. Спектр действия используется в качестве "весового коэффициента" для УФ-спектра, чтобы определить фактическую биологически эффективную дозу для данного результата. В отчетах этого исследования указано

что за 8-летний период среднегодовая освещенность штата Мэн составила 0,15 Вт /м² а для Нью-Мексико составлял 0,35 Вт / м² Среднемесячная освещенность в Нью-Мексико составила 0,5 Вт / м² в июне и 0,18 Вт/м² в январе и для штата Мэн было 0,25 Вт/м² в июне и 0,05 Вт/м² в январе. Это показывает, что количество ультрафиолетового излучения варьируется по всей территории США и меняется в течение года.

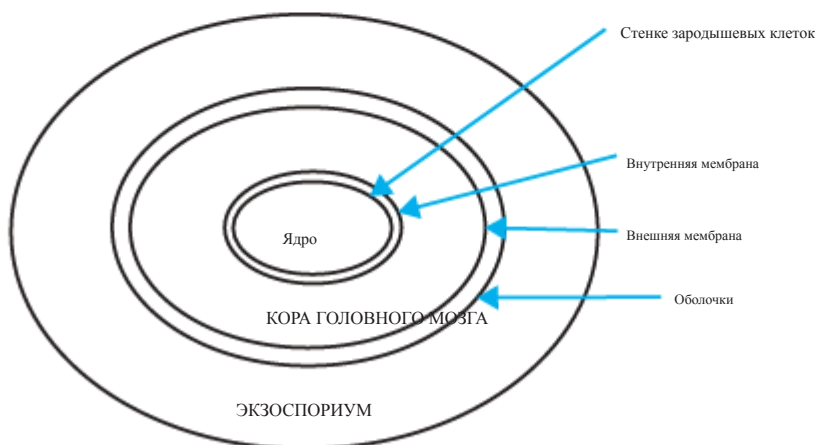
Для данной даты поток не меняется в среднем из года в год; следовательно, ранее опубликованные данные могут быть повторно проанализированы с использованием вновь полученных измерений потока. Для многих объектов в США полные ежедневные измерения флюенса УФ-А и УФ-В проводятся с помощью широкополосных датчиков или сенсоров, настроенных на определенные длины волн. Это исследование проводится Программой мониторинга и исследований UV-B (UVMRP), программой сбора данных и исследований Министерства сельского хозяйства США со штаб-квартирой в университете штата Колорадо (Форт-Коллинз, Колорадо). Веб-сайт UVMRP (<http://UVB.nrel.colostate.edu>) содержит информацию о местном излучении UV-B и UV-A, которая была получена с 1993 года.

17.4 Избранные Организмы

17.4.1 Бактериальные Эндоспоры

Организмы, образующие споры, относятся к числу форм жизни, наиболее устойчивых к дезинфекции и инактивации (Block, 2001). Эндоспоры обладают высокой устойчивостью к различным воздействиям, таким как токсичные химические вещества, высыхание, перепады температуры и давления, а также высокие дозы ионизирующего или ультрафиолетового излучения.

Высокий уровень устойчивости спор связан с их архитектурой. Иллюстрация типичных слоев бактериальных спор, включая экзоспорию, оболочки, внешнюю мембрану, кортекс, стенку зародышевых клеток, внутреннюю мембрану и ядро, показана на рисунке 17.2. Самый внешний слой - это экзоспорий, который представляет собой крупную, свободно прилегающую структуру, состоящую из белков, включая гликопротеины в некоторых бактериях *Bacillus* виды. Количество экзоспориума зависит от вида; например, *Bacillus subtilis* имеет тонкий слой экзоспориума, если таковой имеется. Внутри экзоспориума находятся оболочки спор, которые представляют собой сложные структуры, образованные многими белками в



Структура спор. Воспроизведено с разрешения Setlow (2003). Авторские права Рисунок

многослойность. Внешняя мембрана, который необходим для образования спор, находится под оболочками спор. Расположенная внутри внешней мембраны, кора необходима для уменьшения содержания воды в ядре споры и для образования спящей споры. Кора разрушается при прорастании спор, и это разрушение необходимо для расширения сердцевины спор и последующего разрастания. Стенка зародышевых клеток (состоящая из пептидогликана) под кор- тексом становится клеточной стенкой разрастающейся споры. Внутренняя мембрана спор служит сильным барьером для проникновения химических веществ, повреждающих ДНК спор. Ядро споры содержит ДНК, ферменты, рибосомы и транспортную РНК.

Микроорганизмы используют несколько механизмов для защиты от стрессов окружающей среды, таких как УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ излучение: 1. Нуклеокапсиды и цитоплазма содержат белки, поглощающие ультрафиолетовое излучение. 2. Большинство бактериальных спор, обнаруженных на больших высотах, содержат каротиноиды и меланины, которые поглощают свободные радикалы, образующиеся в результате окислительного повреждения, вызванного ультрафиолетовым излучением (Меллер *et al.*, 2005). 3. Споры могут содержать биохимический путь, который восстанавливает повреждения ДНК, вызванные УФ-излучением

как каротиноиды и меланины, которые поглощают свободные радикалы, образующиеся в результате окислительного повреждения, вызванного ультрафиолетовым излучением (Меллер *et al.*, 2005). 3. Споры могут содержать биохимический путь, который восстанавливает повреждения ДНК, вызванные УФ-излучением

4. Споры защищены толстыми оболочками из спорового белка, состоящими из внутренней и внешней оболочек слоев.
5. Низкое содержание воды в ядре сохраняет ДНК в определенной конформации (форме А), которая более устойчив к ультрафиолетовому излучению (Setlow, 2006).

Бацилла эндоспоры являются наиболее охарактеризованными видами среди спорообразующих бактерий и используются в качестве модельной системы для изучения устойчивости бактериальных эндоспор к экстремальным условиям окружающей среды. Исследования показали, что Споры *B. anthracis* Sterne и *B. subtilis* кинетика ультрафиолетовой инактивации спор идентична; следовательно, *B. subtilis* штаммы могут быть надежно использованы в качестве модели биодозиметрии для ультрафиолетовой инактивации *B. anthracis* споры (Николсон и Галеано, 2003; Менетрез *et al.*, 2006). Однако различные исследователи выявили различную кинетику инактивации для одних и тех же организмов. Это может быть связано с отсутствием согласованных методов воздействия между лабораториями, различной концентрацией спор в жидких образцах (смешанных или несмешанных), качеством и состоянием спор, использованных в исследованиях, или с долей вегетирующих бактерий в образцах. Выявленные различия между некоторыми видами относятся к содержанию плазмид, белков, наличию и толщине споровых оболочек.

17.4.2 Вегетирующие бактерии

Вегетативные бактерии непрерывно растут и размножаются. В отличие от эндоспор, вегетативные бактерии терии лишены споровой оболочки и экзоспориума; однако у них есть клеточная стенка, которая состоит из пептидогликана (белка и сахара). Вегетирующие бактерии могут быть классифицированы либо как грамположительные, либо как грамотрицательные, в зависимости от того, сохраняют ли клетки кристаллический фиолетовый краситель во время процедуры окрашивания по граму. Грамположительные бактерии имеют толстый слой пептидогликана внутри своих стенок, которые также содержат модифицированные спирты, называемые тейхоевыми кислотами (Kratz, 2005). Некоторые бактерии, такие как *Mycobacterium tuberculosis*, имеют воскообразный внешний слой, устойчивый к дезинфицирующим средствам. Грамотрицательные бактерии имеют тонкий слой пептидогликана внутри своих стенок и дополнительный внешний слой, называемый "внешней мембраной". Внешняя мембрана состоит из фосфолипидов, липополисахаридов, липопротеинов и канальных белков. Некоторые бактерии не имеют грамположительных или грамотрицательных клеточных стенок. Ядерный материал вегетативных организмов.

бактерии являются местом-мишенью для повреждения ультрафиолетовым излучением; они расположены внутри заполненной жидкостью цитоплазмы, которая сама находится внутри плазматической мембраны.

17.4.3 Вирусы

Вирусы, которые являются одними из мельчайших инфекционных агентов, существуют на границе между живыми организмами и химическими образованиями. Вирусы состоят из нуклеиновых кислот, окруженных белковой оболочкой, называемой "капсидом". Различные вирусы могут инфицировать, а затем реплицироваться внутри различных клеток-хозяев. Некоторые вирусы имеют дополнительный слой, окружающий капсид, называемый "оболочкой", которая состоит из фосфолипидов, белков и углеводов. Оболочка забирается у хозяина, когда вирус покидает клетку-хозяина. Нуклеиновые кислоты в вирусе могут представлять собой ДНК или РНК и могут быть двух- или одноцепочечными, а некоторые вирусы содержат как ДНК, так и РНК.

Многие вирусы (более 90) могут вызывать заболевания у людей (Филдс и Найп, 1990; Найп и Хоули, 2001). Из-за их очевидной хрупкости и чувствительности к солям, растворителям и давлению можно было бы ожидать, что вирусы будут более чувствительны, чем бактерии, к другим воздействиям окружающей среды. Однако недавние наблюдения и экспериментальные измерения показывают, что вирусы могут проникать в окружающую среду дальше, чем ожидалось ранее. Например, в результате утечки информации из бывшего Советского Союза сообщалось о случайном заражении военно-морского персонала в 11 милях от берега от места тестирования на оспу (Такер и Жилинскас, 2003), что указывало на то, что вирусы могут выживать в течение длительных периодов времени и на больших расстояниях на открытом воздухе.

Литл и Сагрипанти (2005) проанализировали опубликованные данные о чувствительности вирусов к ультрафиолетовому излучению и разработали подход для оценки выживаемости различных вирусов после их высвобождения в любом месте и в любое время года. Бен-Давид и Сагрипанти (2010) смоделировали использование солнечного ультрафиолетового излучения для инактивации вирусов, распыленных в атмосфере. Они подсчитали, что полный день пребывания на солнце в среднем снизил бы инфекционность вирусов, чувствительных к ультрафиолетовому излучению, на $3 \log$. Аналогичные расчеты использовались государственными учреждениями для оценки персистенции вируса¹⁰ в окружающей среде во время недавних эпидемий гриппа (Сагрипанти и Литл, 2007).

Хотя вирусы млекопитающих являются возбудителями эпидемий среди людей, лишь немногие из них использовались в УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ экспериментах и других исследованиях выживания из соображений безопасности. Бактериофаги часто изучаются как заменители инфекционных вирусов; однако фаги сильно отличаются по морфологии, составу и устойчивости к ультрафиолетовому излучению по сравнению с вирусами млекопитающих, представляющими интерес для общественного здравоохранения и биологической защиты (Литл и Сагрипанти, 2005). По этим причинам бактериофаги не используются для дезинфекции.

17.5 Воздействие ультрафиолетового излучения на находящиеся в аэрозоле организмы

17.5.1 Повреждение клеток, вызванное ультрафиолетовым излучением

ДНК является наиболее чувствительной мишенью организма, а ультрафиолетовый свет химически модифицирует генетический материал микроорганизмов (Литл и Сагрипанти, 2005). Ненасыщенные связи, присутствующие в биологических молекулах, таких как коферменты, гормоны и переносчики электронов, также могут быть восприимчивы к повреждению ультрафиолетом.

Нуклеиновые кислоты имеют пики поглощения при 200 и 265 нм. Излучение с длиной волны 200 нм поглощается молекулами рибозы и фосфата в остовах ДНК, а излучение с длиной волны 265 нм поглощается нуклеотидными основаниями тиминном, аденином, цитозином и гуанином (Ковальски, 2009). Таким образом, среди областей ультрафиолетового излучения излучение UV-C (254 нм, близко к максимальному поглощению ДНК) наиболее эффективно инактивирует организмы, излучение UV-A (320 - 380 нм) инактивирует организмы наименее эффективно, а излучение UV-B (290 - 320 нм) попадает в середину. Чувствительность к ультрафиолетовому излучению обратно пропорциональна размеру (или молекулярной массе) генома, так что более мелкие молекулы ДНК подвергаются более серьезному воздействию ультрафиолетового излучения (Литл и Сагрипанти, 2005).

УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ излучение может вызвать образование поперечных связей между двумя соседними основаниями тимина. Результатом является образование стабильных димеров тимина, которые ингибируют репликацию и инактивируют бактерии и ДНК-вирусы (Масшелейн и Райс, 2002). Кроме того, тимин образует поперечные связи с тиминном в соседних цепях ДНК и белках, инактивируя ДНК и отрицательно влияя на размножение. Поперечные связи также могут возникать между цитозином и гуанином, но для этого требуется больше энергии из-за трех водородных связей между ними. Другие димеры, образующиеся после воздействия ультрафиолета, включают димеры цитозина, димеры цитозин-тимина, димеры урацила, димеры урацил-тимина и димеры урацил-цитозина. Образование димеров происходит в основном после воздействия УФ-А, тогда как поражения других типов возникают в результате воздействия УФ-В и УФ-С. В гидратированном состоянии образуется меньше димеров, так как оно менее компактно и нуклеотиды расположены относительно далеко друг от друга (Schreier *et al.*, 2007).

Урацил занимает место тимина в РНК. Димеры урацила образуются после воздействия УЛЬТРАФИОЛЕТА на РНК, но не в такой степени, в какой димеры тимина образуются в ДНК. РНК также ковалентно связывается с белками в ответ на ультрафиолетовое облучение. Серия поражений пиримидин-пиримидоном (6-4) (называемых фотопродуктами 6-4) также возникает в результате воздействия ультрафиолета.

Поскольку двухцепочечная РНК обладает большей структурной стабильностью, она более стабильна после УФ-воздействия, чем одноцепочечная РНК (Rauth, 1965; Becker and Wang, 1989). Параллельные результаты в отношении ДНК-вирусов указывают на то, что двухцепочечные ДНК-вирусы также более устойчивы, чем одноцепочечные ДНК-вирусы (Tseng and Li, 2007). Кроме того, ДНК-вирусы более устойчивы, чем РНК-вирусы с таким же количеством нитей (двойных или одинарных).

Подобно нуклеотидным поперечным связям, нуклеотиды также могут связываться с водой в ответ на воздействие ультрафиолета - конечно, в процессе, называемом фотогидратацией. Реакции фотогидратации заставляют цитозин и урацил связываться с молекулами воды; однако с тиминном этого не происходит. В отличие от повреждения ДНК и РНК, фотогидратация не зависит от длины волны (Черутти *et al.*, 1969; Ремсен, Миллер и Черутти, 1970).

17.5.2 Фоторемонт

Многие бактерии окружающей среды живут в равновесии между повреждением от ультрафиолета и восстановлением. Механизмы восстановления запускаются сразу после воздействия солнечного света и продолжаются всю ночь, при этом организмы должны быть полностью восстановлены к следующему утру. Ремонт, который происходит ночью, называется ремонтом в темноте. Использование световой энергии для восстановления после повреждения ультрафиолетовым излучением называется фоторемонтом, фотоприсоединением или фотореактивацией (Печча и Эрнандес, 2001; Сюэ и Николсон, 1996). Активность фоторемонтной пары показывает начальный пик в области УФ-А (320-380 нм). Кроме того, видимый свет (380-750 нм) также используется клетками, подвергающимися фоторемонту. Степень фотореактивации вегетирующих бактерий зависит

в зависимости от конкретного вида и штамма. Фоторемонт не происходит на стадии образования спор, но происходит во время и после прорастания спор.

Организмы используют три основных процесса репарации в ответ на ультрафиолетовое излучение. В первом процессе, называемом "процессом эксцизионной репарации" или "механизмом вырезания и залатывания", серия клеточных ферментов заменяет димеры тимидина на недимеризованный тимин. Во втором случае определенные споры и вегетирующие бактерии используют фотоны в видимом и ультрафиолетовом свете, чтобы обратить вспять повреждение ДНК путем мономеризации димеров. В третьем случае клетки спасаются от серьезного повреждения ДНК: за полимеризацией вокруг повреждения ДНК следует удаление поврежденных участков и нормальный синтез ДНК. Однако этот процесс может привести к мутации из-за добавления дополнительных оснований (Coohill and Sagripanti, 2008; Hanawalt, 1989). Процессы фоторемонта оптимизируются при различных температурах, в зависимости от ферментов, используемых конкретными клетками. Влажность также влияет на процесс фоторемонта; воздействие окружающей среды с высокой относительной влажностью (RH) обычно способствует фотореактивации, облегчая общую функцию клеток.

Интенсивность восстановления зависит от величины полученных повреждений и биологической организации микроорганизма. Механизм репарации включает образование фермент-субстратных комплексов в месте повреждения ДНК, где поглощается энергия света для репарации. Photorepair устраняет повреждения, возникшие в результате воздействия узкополосного УФ-С-излучения (254 нм). Излучение, создаваемое УФ-лампами широкого спектра действия, повреждает ферменты и другие составляющие микроорганизмов, и процессы фоторемонта не способны устранить это повреждение.

17.5.3 Типичная кривая выживаемости при воздействии ультрафиолета

Убивающий эффект ультрафиолетового излучения можно количественно оценить по нескольким параметрам,

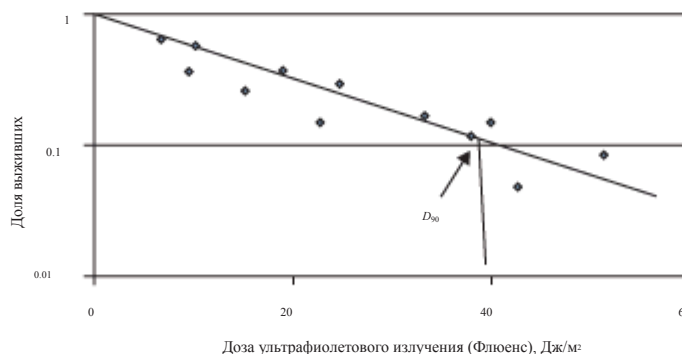
таким как дозы, необходимые для уничтожения 90 и 99% существующих организмов (D_{90}

доза, необходимая для 37%-ной выживаемости организмов (D_{37}). D_{90} и D_{99} часто бывают или с^{-1} и D_{99} , соответственно) и обозначается как $F_{-1\log}$ и F

, соответственно (Король, Кешаван и Сагрипанти, 2011). $D_{37-2\log}$

соответствует количеству радиации, необходимому для нанесения в среднем одного смертельного удара на организм (Литл и Сагрипанти, 2005).

Кривая, описывающая выживаемость организмов после воздействия ультрафиолета, была смоделирована таким образом, чтобы учитывать различные сложности, такие как то, как организм поврежден и как он восстанавливает повреждения. Кривая дезинфекции, показанная на рис. 17.3, отражает простую экспоненциальную



Пример кривой дезинфекции или распада, которая показывает распад первого порядка. Адаптировано Рисунок 17.3 с разрешения Ковальски, 2009. Copyright © 2009, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

(Уравнение 17.1). Это модель распада первого порядка, которая обеспечивает относительно точные значения для D_{90} и D_{99} . Более высокие значения констант скорости (или наклона) указывают на быструю дезинфекцию, и более низкие значения указывают на медленную дезинфекцию:

$$S = e^{-kD} \quad (17.1)$$

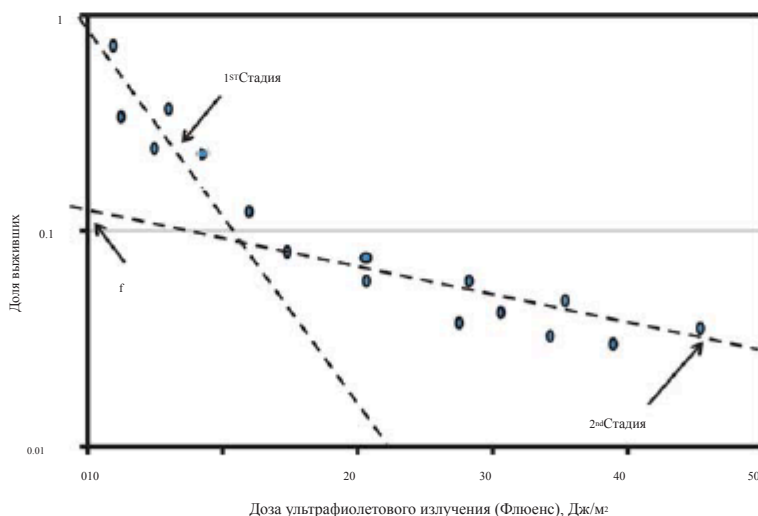
где S является ли доля выживаемости (количество организмов, переживших облучение, деленное на количество организмов до облучения), k является ли скорость УФ-излучения постоянной (обычно в m^2 /J), и D - доза или флюенс (обычно в Дж / m^2).

Часто, крошечная доля (иногда $< 1\%$, но достигает 40-50% при защите средами или пигментами) организмов проявляют более высокий уровень резистентности и значительно более низкую константу скорости. В этом случае наблюдается быстрый спад, который можно отнести к восприимчивой популяции; за этим следует более медленный спад, который соответствует явно устойчивой популяции. Если резистентная популяция составляет порядка 1% или менее, ее можно идентифицировать графически после D_{90} достигнуто значение. На этой кривой двухступенчатого затухания (показано на рисунке Рис. 17.4), выживаемость описывается:

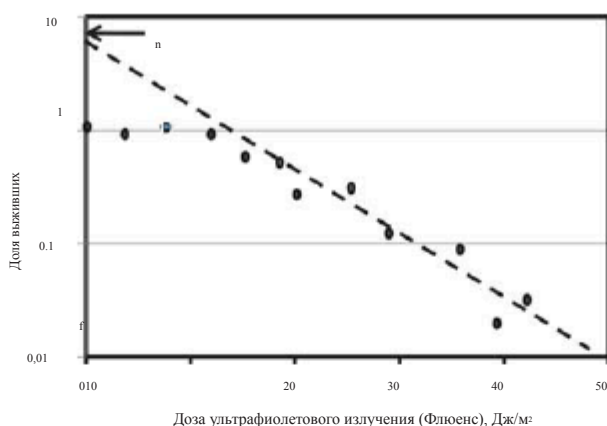
$$D_{k_1} S = (1 - f)e^{-k_1 D} + fe^{-k_2 D} \quad (17.2)$$

где f является устойчивой фракцией, k_1 является постоянной скоростью первой ступени, и k_2 является постоянной скоростью второй ступени.

Ранняя часть изгиба также может иметь плечевую область, где нет необратимых повреждений. Бактерии могут восстанавливать повреждения, вызванные низким уровнем воздействия ультрафиолета. Это было экспериментально продемонстрировано отсутствием изменений в концентрациях культивируемых бактерий при увеличении воздействия определенных уровней ультрафиолетового излучения (обзор сделан в Coohill and Sagripanti, 2008). Длина плечевой области отражает способность организмов противостоять и восстанавливать повреждения и зависит от конкретного организма и чувствительности анализа. За плечевой областью следует линейная область первого этапа на логарифмически-линейном графике, как



Пример кривой дезинфекции, которая показывает первую и вторую стадии распада. Рисунок 17.4 Адаптировано с разрешения Ковальски, 2009. Авторское право © 2009, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.



Пример кривой дезинфекции или распада, которая показывает плечо и первую стадию Рисунок

17.5 области распада. Адаптировано с разрешения Ковальски, 2009. Copyright © 2009, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

показано на рисунке 17.5 (Кухилл и Сагрипантти, 2008). Модель multihit (Ковальски, 2009)

показывает кривую выживаемости, которая включает плечо и линейную часть, как:

$$S(t) = 1 - (1 - e^{-kD})^n \quad (17.3)$$

где k является постоянной скоростью (наклон линейной части кривой) и n является ли плечо постоянной величиной, которая равна y -перехвату оси. Уравнения, используемые для описания микробного распада, которые включают в себя начало, за которым следуют два процесса распада (быстрый и медленный), также существуют, но они здесь не показаны.

Как показано на рисунке 17.4, кривые распада могут заканчиваться хвостом, который указывает на наличие устойчивой популяции. Также могут быть другие причины появления хвостов. Например, хвосты часто появляются на кривых распада в экспериментах, проводимых с бактериями на поверхностях агара. Поверхности агара имеют микроскопические ямки и трещины. Бактерии внутри этих микротрещин подвергаются меньшему воздействию ультрафиолетового излучения или вообще не подвергаются ему, и поэтому кажутся устойчивыми. Если бы 1 бактерия из 1000 была экранирована, то линейная часть кривой распада заканчивалась бы на $-3 \log_{10}$ уровень и хвосты будут видны после этого момента. Для бактерий, попавших на фильтр.

бумага, результирующие кривые распада которых определяются структурой фильтровальной бумаги и содержанием влаги. Чтобы уменьшить эти поверхностные эффекты, некоторые исследователи облучали бактерии во время перемешивания их в разбавленных растворах, чтобы подвергнуть все их воздействию сопоставимых уровней ультрафиолетового излучения (Меллер *et al.*, 2005). Для этих экспериментов среда должна быть прозрачной, а плотность ячеек должна быть достаточно низкой, чтобы между ячейками в центре контейнера и ячейками, расположенными ближе к стенкам контейнера, не возникало теневых эффектов.

17.5.4 Постоянная скорость УФ-излучения

Когда организмы подвергаются воздействию ультрафиолетового излучения, они разлагаются в зависимости от дозы (флюенса), где наклон логарифмической кривой распада определяется как константа скорости, k . На константу скорости влияют относительная влажность, температура, конформация ДНК (А или В), уровень облучения, фотореактивация, тип УФ-лампы, диапазон доз, среда для культивирования и метод, а также конкретный штамм организма. Как обсуждалось в предыдущем разделе, результирующий распад

кривые имеют разную форму для разных организмов, а линейные участки приводят к разным константам скорости. Трудно проводить сравнения между организмами, которые имеют разные формы распада. Следовательно, D_{90} значение часто используется для сравнения различных организмов, а константа скорости (известная как "восприимчивость к ультрафиолетовому излучению", с единицами измерения в квадратных метрах на джоуль) рассчитывается как:

$$D_{90} = \frac{-\ln(1-0.9)}{k} = \frac{2.3}{k} \quad (17.4)$$

Это уравнение не описывает фактическую форму кривой затухания, которая может иметь плечо и один или два линейных участка; следовательно, D_{90} чаще используется для сравнения

исследований или организмов. Доза, необходимая для сокращения популяции микроорганизмов до 10% от первоначального количества, указана как T_{10} , и поток, снижающий микробную нагрузку на 4 логарифма 10 обозначается как $4T$. Альтернативно, параметр, полученный из квантовой механики и статистически-

тическими повреждений может быть использован для характеристики чувствительности микроорганизмов к ультрафиолетовому излучению. В D_{37} значение равно обратной величине наклона и соответствует воздействию ультрафиолетового излучения, которое приводит в среднем к одному смертельному поражению организмов, в результате чего выживаемость составляет 37%. D может быть рассчитан путем деления потока, который деактивирует 1 логарифм 10

37

вирусная

нагрузка (полученная из линейной части графиков) на 2,3 (натуральное

логарифмическое основание). Меньшее значение для D указывает на более высокую чувствительность к инактивации ультрафиолетовым излучением.

17.5.5 Влияние относительной влажности и температуры

Влияние уровня резус-фактора на восприимчивость микроорганизмов к ультрафиолетовому излучению изучалось в течение многих лет, но четкого консенсуса достигнуто не было. Как упоминалось в предыдущем разделе, ДНК существует в конформациях А и В. Конформации меняются в ответ на изменения уровня RH. Конформация А возникает в условиях низкой относительной влажности, когда молекулы воды десорбируются из ДНК в результате гидрофобной природы более плотных внутренних каналов. В условиях высокой относительной влажности ДНК гидратируется до конформации В. Большинство бактерий, как правило, проявляют пониженную восприимчивость к ультрафиолетовому излучению при воздействии высоких уровней относительной влажности, но некоторые реагируют с противоположным эффектом или вообще без эффекта, а вирусы реагируют с смешанными эффектами. В исследованиях *Escherichia coli*, *Mycobacterium parafortuitum* и *Staphylo- кокковый эпидермис*, низкая восприимчивость была выявлена при воздействии условий с высокой относительной влажностью (Ковальски, 2009). Ской *et al* (2005) сообщил о аналогичных результатах в экспериментах, в которых

М.

parafortuitum клетки распыляли в аэрозоле для определения эффективности ультрафиолетового бактерицидного облучения воздуха верхних помещений. Макдевитт *et al.* (2007) показали, что восприимчивость к вирусу коровьей оспы повышалась с уменьшением резус-фактора. Кроме того, Ценг и Ли (Tseng and Li, 2007) оценили выживаемость фракции четырех вирусов при уровнях относительной влажности 55 и 85%, и результаты показали, что восприимчивость повышалась при более низких уровнях относительной влажности. Аналогичные эффекты наблюдались в исследовании Лин и Ли (2002), которые обнаружили, что восприимчивость микроорганизмов при 80% относительной влажности была ниже, чем при 50% относительной влажности. Организмы, использованные в этом тесте, были *E. coli* клетки, *B. subtilis* споры, *Candida famata* var. *flareri* клетки, и *Penicillium citrinum* споры. Несколько исследований показали, что восприимчивость высока для организмов в средах с высокой относительной влажностью. Например, для некоторых штаммов из *Serratia marcescens* дезинфекция усиливается при более высоких уровнях относительной влажности (Ковальски, 2009).

Ковальски (2009) сообщил, что D_{90} значение для инактивирующих организмов в воздухе с высокой относительной влажностью было в пять раз выше, чем для организмов в воздухе с низкой относительной влажностью. В том же отчете D_{90} ценность для уровень инактивации организмов в воде был в два раза выше, чем у организмов в воздухе с высокой относительной влажностью.

В любом случае, явно противоречивые сообщения об изменениях, связанных с относительной влажностью, описывают лишь незначительное воздействие на восприимчивость организмов к ультрафиолетовому излучению.

Например, нормальные изменения относительной влажности окружающей среды (50-70%) влияли на выживаемость вируса гриппа только на 9%, в то время как экстремальные изменения относительной влажности (15-90%) влияли на вирус в 12,5 раз (Хеммс, Винклер и Кул, 1960). Носовые выделения инфицированного пациента могут содержать 10^7 вирусных частиц на миллилитр (Coach, 1995), а увеличение относительной влажности может снизить концентрацию жизнеспособных частиц до 10^6 частиц на миллилитр. Это снижение незначительно, если рассматривать его в контексте предотвращения передачи заболевания. Для сравнения, влияние солнечной радиации или УФ-ламп для помещений на инактивацию микроорганизмов как на улице, так и в помещении существенно.

Температура также влияет на воздействие УФ-излучения. Более высокие температуры могут вызвать структурные изменения фосфолипидов, белков и ДНК клеточных мембран. Ко, Мелвин и Бердж (2002) сообщили, что эффективность УФ-излучения значительно повышалась при повышении температуры.

был увеличен с 4 до 25 °C. УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ излучение, вероятно, вызывает мутагенные эффекты при высоких температурах, когда ДНК становится более гибкой из-за более активного метаболизма.

17.5.6 Скопления бактерий

Большинство предыдущих исследований, направленных на установление бактерицидного действия ультрафиолетовых ламп или солнечного света, проводились с использованием отдельных спор на поверхностях и в воздухе (King, Kesavan, and Sagripanti, 2011; Foarde *et al.*, 2006; обзор в Coohill and Sagripanti, 2009). Однако внешние слои спор в кластере могут защищать организмы в центре.

Убивающий эффект ультрафиолетового излучения на все организмы в кластере может быть недооценен данными, полученными в результате испытаний на дисперсию отдельных спор.

Скопление также защищает бактерии в центре от воздействия ультрафиолета и, следовательно, может повлиять на кривые выживаемости. На основе предыдущих расчетов для излучения с длиной волны 254 нм 61% падающего света будет проходить через один организм (Coohill, 1986).

Аналогично, два организма, защищающие третий организм, позволят достичь последнего только 37% падающего ультрафиолетового излучения. Следовательно, образование комков может защитить бактерии в центре от ультрафиолетового излучения и, таким образом, вызвать образование хвостов, наблюдаемых на кривых распада в некоторых экспериментах.

17.6 Дезинфекция помещений с использованием ультрафиолетового излучения

УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ лампы, генерирующие излучение с длиной волны 254 нм (UV-C), были предложены в качестве дополнительного средства бактерицидного контроля в медицинских учреждениях (Рабочая группа по руководству по борьбе с туберкулезной инфекцией, 1994) из-за связанных с этим низких затрат, простоты применения и потенциальной эффективности. Лампы UV-C могут использоваться в закрытых каналах систем механической вентиляции и установках локальной рециркуляции, а также в открытых конфигурациях в помещениях.

В нескольких исследованиях (Рутала, Герген и Вебер, 2010; Xu *et al.*, 2003) снижение количества бактериальных спор и вегетативных клеток увеличивалось в ответ на ультрафиолетовое облучение воздуха верхних помещений. Как и ожидалось, сообщалось, что ультрафиолетовые лампы, установленные для облучения воздуха в верхних помещениях, более эффективны при инактивации вегетирующих бактерий, чем бактериальных спор (Miller and Macher, 2000). В одном из первых исследований, продемонстрировавших преимущества бактерицидных ультрафиолетовых ламп, было показано, что количество случаев заражения гриппом в госпитале для ветеранов сокращается по сравнению с инфекциями в соседних, необлучаемых больничных палатах (McLean, 1956). Центр США по контролю и профилактике заболеваний (CDC) рекомендует, чтобы больничные изоляторы проветривались не менее 12 раз в час с подачей чистого наружного воздуха (Siegel *et al.*, 2007). В

кроме того, общее правило для количества ультрафиолетовых ламп в помещении заключается в том, что на каждые 18 м следует использовать одну лампочку мощностью 30 Вт. ² от площади помещения или на каждые семь человек в комнате. В исследовании Сюя *et al.* (2005), которые включали в себя вчетверо более высокую мощность УФ-излучения, чем рекомендуется руководящими принципами CDC, было показано, что УФ-излучение, равномерно распределенное по всему помещению, более эффективно, чем УФ-излучение с неравномерным распределением.

В исследовании, проведенном Мензисом *et al.* (2003), было показано, что УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ лампы, установленные в системах вентиляции офисов, снижают концентрацию микробов и эндотоксинов на облучаемых поверхностях внутри систем вентиляции на 99% (2 log), а также уменьшают респираторные ¹⁰ и скелетно-мышечные симптомы у офисного персонала. Ко, Мелвин и Бердж (2002) показали, что УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ бактерицидное облучение в верхнем помещении значительно снижало концентрацию культивируемых бактерий в нижнем помещении. Исследование, проведенное в испытательной камере (King, Kesavan, и Sagripanti, 2011), показало, что способность бактерий к культивированию снижалась в ответ на воздействие УФ-С-излучения. Эти результаты указывают на то, что ультрафиолетовое облучение может способствовать борьбе с инфекционными заболеваниями.

17.7 Исследования воздействия солнечного света

В предыдущих исследованиях как солнце, так и искусственные источники света предназначались для имитации спектра солнечного света (Мунаката, 1999; Munakata *et al.*, 2000a, 2000b) использовались для воздействия на организмы прямым и косвенным излучением. Необходимо учитывать воздействие как прямого, так и косвенного излучения, чтобы полностью объяснить воздействие ультрафиолетового излучения на организмы.

Анализ исследований воздействия солнечного света показывает, что чувствительность к ультрафиолетовому излучению организмов *B. anthracis* Споры стерна сходны со спорами *B. subtilis* споры (штамм SN624, ATCC 6633), что позволяет предположить, что *B. subtilis* может быть использован в качестве суррогата для *B. anthracis* Стерна в исследованиях по обезвреживанию ультрафиолетовым излучением (Nicholson and Galeano, 2003).....). Кроме того, каротиноподобный пигмент содержится в *Bacillus atrophaeus* Споры DSM 675 на больших высотах влияют на устойчивость спор к ультрафиолетовому излучению окружающей среды (Moeller *et al.*, 2005).

Дозы ультрафиолетового излучения, измеренные Министерством сельского хозяйства США, использовались для определения показателей гибели вирусов от воздействия солнечного света (Сагрипанти и Литл, 2007; Литл и Сагрипанти, 2005). Поток на каждой длине волны в области UV-B был умножен на соответствующее нормализованное значение спектра действия, основанное на эффекте нейтрализации 254 нм. Было определено, что бактерицидная активность солнечного света достигает максимума при 300-305 нм, при этом солнечный поток между этими длинами волн составляет 75% от общего эффективного бактерицидного солнечного потока (Sagripanti and Lytle, 2007). Таким образом, УФ-дозиметр с чувствительностью от 295 до 305 нм обеспечивает полезную корреляцию между дозой солнечного света и бактерицидным эффектом (Кухилл и Сагрипанти, 2009).

По соображениям удобства при тестировании воздействия солнечной энергии на окружающую среду предпочтение отдается искусственному солнечному свету (Агентство по охране окружающей среды США, 2010). Beebe *et al.* (1962) разоблаченный *B. anthracis* Горит до 600 мкВт / см² (1 Вт/м²) искусственного солнечного света с использованием General Electric

(Скенектади, Нью-Йорк) солнечные лампы типа RS с длиной волны < удаляли 305 нм. Мышей подвергали воздействию необлученного и облученного излучения *B. anthracis* споры для определения влияния имитированного солнечного ультрафиолета на вирулентность.

В дополнение к таким экспериментам Литлом и Сагрипанти (2005) и Бен-Давидом и Сагрипанти (2010) были разработаны математические модели, которые предсказывают инактивацию вируса под действием солнечной радиации. Эти авторы предсказали инактивацию вируса натуральной оспы как

а также от Эболы, Марбургского, крымско-конголезского, Хунина и других геморрагических вирусов и от венесуэльского лошадиного энцефалита в различных частях мира. Использование таких расчетов позволяет исследователям прогнозировать выживаемость организмов на открытом воздухе, избегая при этом опасностей, связанных с работой с инфекционными агентами.

17.8 Рекомендации по тестированию

Во многих предыдущих исследованиях воздействия ультрафиолетового излучения не все переменные были проверены и не была представлена вся информация, необходимая для дублирования экспериментов и подтверждения выводов. Переменные, которые следует указывать в исследованиях воздействия ультрафиолета и солнечной активности, включают температуру, относительную влажность, состояние влажности частицы (влажная или сухая), состояние поверхности (если на поверхности оседают микробы), дозиметрию, условия окружающей среды (дата, время суток, высота, широта), стадию развития организма (экспоненциальная или стационарная фаза), количество присутствующего мусора и соотношение вегетативных и споровых бактерий, а также любые другие соответствующие химические или биологические условия (Кухилл и Сагрипанти, 2009). Биологические параметры, такие как способность организма к репарации, стадия его жизненного цикла, температура образца и УФ-спектр излучения, являются одними из наиболее важных переменных, определяющих, предполагается ли воспроизводимость.

Предыдущие исследования показали, что тип микробного поражения, возникающего после солнечного ультрафиолетового облучения, зависит от длины волны. Например, биоцидная эффективность длины волны 300 нм в 100 раз выше, чем у длины волны 320 нм. В лабораторных экспериментах для имитации солнечного излучения обычно используется относительно узкий диапазон длин волн. Недостатком использования метода узкодиапазонного облучения является то, что, как сообщалось, солнечный спектр вызывает биологические эффекты, которые могут на порядок отличаться по величине от таковых при лабораторных исследованиях монохроматического излучения. Кроме того, УФ-А и видимое излучение могут способствовать фоторемонту повреждений, вызванных другими длинами волн, и этот эффект не наблюдался бы при воздействии на микробы узким диапазоном длин волн.

Время воздействия солнечного света и его продолжительность являются важными параметрами для прогнозирования длины волны и дозы облучения организмов. Наибольший ущерб от солнечных лучей наносится в солнечный полдень, при этом меньший ущерб наносится по обе стороны от полудня в результате уменьшения потока ультрафиолетового излучения. Поэтому необходимо регистрировать время пребывания на солнце и точно измерять дозиметрию.

Были высказаны предположения о необъяснимых различиях между воздействием искусственных источников и солнечного света на инактивацию микроорганизмов. Было сообщено об образовании различных фотопродуктов в ответ на воздействие УФ-А, УФ-В и УФ-С излучения (Николсон, Сетлоу, and Setlow, 2002). Поэтому необходимо проявлять особую осторожность при выборе длины волны воздействия и подборе соответствующего дозиметра с учетом длины волны или спектрального отклика, который точно отражает дозу, полученную организмами во время тестирования.

Исследователи используют три различных метода для определения воздействия ультрафиолетового излучения на микроорганизмы: на поверхностях, в жидкостях и в аэрозолях. Часто дезинфекцию организмов на поверхностях изучают путем воздействия на организмы на агаровых пластинах; этот метод позволяет подвергать организмы воздействию ультрафиолетового излучения только с одной стороны. В качестве альтернативы организмы, находящиеся в жидких или воздушных суспензиях, могут подвергаться воздействию ультрафиолетового излучения со всех сторон. Когда организмы подвергаются воздействию идентичного источника излучения в любом из трех физических условий (поверхность, жидкость, или аэрозоль), для получения сопоставимого ущерба требуются различные скорости излучения.

Целью многих исследований является определение чувствительности бактериальных спор к ультрафиолетовому излучению. Качество и состояние спор в образце влияют на их реакцию на ультрафиолетовое облучение. Соотношение вегетативных бактерий и спор в бактериальном препарате сильно влияет на реакцию этого препарата на ультрафиолетовое облучение, поскольку споры в 5-10 раз более устойчивы к ультрафиолетовому излучению, чем вегетативные бактерии того же вида (Кухилл и Сагрипантис, 2008). Физическое состояние образца также влияет на инактивацию: организмы в жидкости или на пластинках с агаром окружены слоями воды, что может обеспечить уровень защиты, которого нет у организмов на сухих поверхностях или взвешенных в воздухе.

При солнечном воздействии инактивация спор не зависит от температуры; однако растительные бактерии более устойчивы при более высоких температурах, поскольку вегетативные клетки, в отличие от спор, могут подвергаться фотореактивации для восстановления полученных повреждений. Когда желательно уменьшить или устранить фотореактивацию, вегетативные бактерии подвергаются воздействию солнечного света в

около 0 °С. Кроме того, споры могут оставаться в состоянии покоя в течение многих недель после экспонирования, конечно, но вегетативные бактерии должны быть культивированы немедленно. Мутанты с дефицитом репарации растительных бактерий используются в некоторых исследованиях для определения кинетики инактивации, но эти тесты проводятся быстро и требуют более короткого времени воздействия, которое трудно точно измерить.

17.8.1 Методика испытаний в нашей лаборатории

Мы разработали методологию определения эффективности дезинфекции УФ-С-излучением имитированного солнечного света для организмов, взвешенных в воздухе. Мы тестировали споры и скопления спор разного размера. Аналогичная методология использовалась для воздействия ультрафиолетового излучения на вегетирующие бактерии. Организмы, осажденные на мембранных фильтрах и поверхностях агара, использовали для определения эффективности обеззараживания против организмов, находящихся на поверхностях. Для проведения аэрозольных испытаний использовались камеры, заполненные биоаэрозолями.

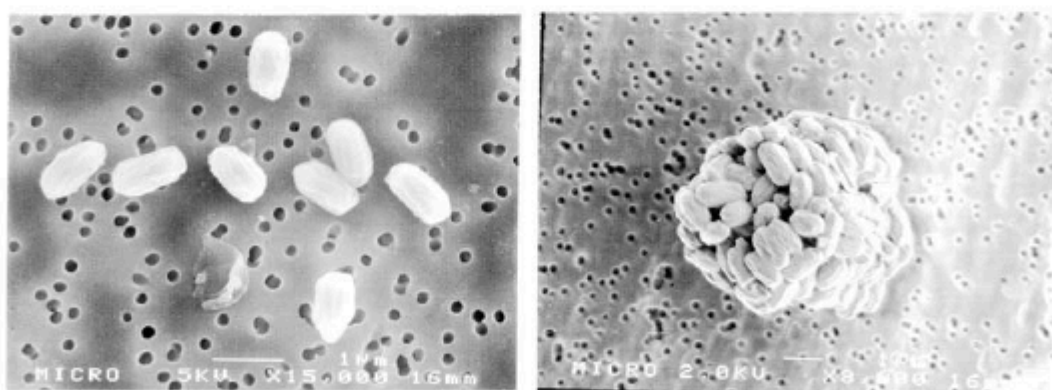
17.8.1.1 Оборудование, используемое при испытаниях Для исследований аэрозольной дезинфекции использовали небулайзер

Collison (BGI, Inc., Уолтем, Массачусетс) для получения частиц, содержащих отдельные организмы. Для тестирования аэрозоля использовали аэрозольный генератор

(Милтон, Нью-Йорк) для получения кластеров биоаэрозоля. Каждый прибор

и испытательная камера кратко описаны в следующих разделах. Примеры отдельных спор

и скоплений, образовавшихся во время тестирования, показаны на рисунке 17.6.



(a)(b)

Рисунок 17.6

(а) Одиночная спора. (б) Приблизительно 4 м³скопившиеся бактериальные споры.



Рисунок 17.7 Распылитель Collison. Цветное исполнение смотрите в разделе "Пластины".

17.8.1.2 Распылитель Collison

Небулайзеры Collison (рис. 17.7) с 4, 6, 24 и 36 форсунками использовались в ЕСВС для получения односпоровых частиц для тестирования аэрозоля. Тестируемые организмы добавляли в деионизированную воду, и этот раствор использовали в распылителе. Чтобы свести к минимуму возможность появления дублетных и триплетных организмов в каждой аэрозольной частице, использовались относительно низкие концентрации микроорганизмов. Распылитель Collison был подключен к источнику сжатого воздуха. Воздух выходил с высокой скоростью из небольших отверстий внутри распылителя. Низкое давление, созданное в области выхода, привело к тому, что раствор водных организмов был вытянут со дна распылителя через вторую трубку (в соответствии с эффектом Бернулли). Жидкость выходила из трубки в виде тонкой нити накала. По мере ускорения в потоке воздуха жидкая нить растягивалась до тех пор, пока не распалась на капли. Струя распыления направлялась на стену. Более крупные капли ударялись о стену и удалялись из воздуха.

17.8.1.3 Генератор аэрозоля Sono-Tek

Ультразвуковые распылительные форсунки Sono-Tek, подобные показанной на рис. 17.8, использовались для получения капель жидкости и смесей материалов, взвешенных в жидкостях, которые были

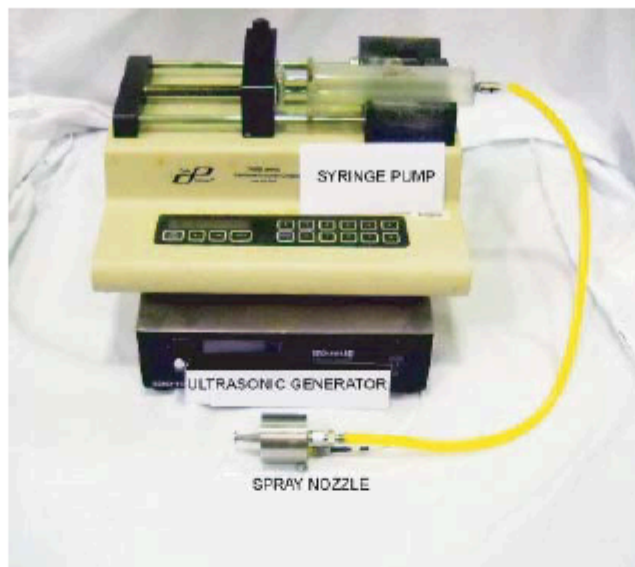


Рисунок 17.8 Генераторы аэрозоля Sono-Tek. Цветное исполнение смотрите в разделе "Таблица".

затем высушивают до получения сухого аэрозоля из частиц остаточного материала. В биологических экспериментах, аэрозольная смесь состояла из организмов, взвешенных в воде. Конечный размер частиц определялся исходя из концентрации материала в исходной жидкости и характерного размера капель, полученных методом Sono-Tek. Скорость образования аэрозоля зависела от скорости, с которой текучая смесь подавалась в сопло Sono-Tek. Доступны пять моделей аэрозольного генератора Sono-Tek для производства частиц со средним диаметром в диапазоне от 23 до 70 мкм (при рабочих частотах 120-25 кГц) и расходом от нескольких микролитров в секунду до примерно 6 галлонов в час. Мы использовали модель с частотой 25 кГц, питаемую перистальтическим насосом, и модель с частотой 120 кГц, питаемую шприцевым насосом. Они использовались для создания регулируемой концентрации аэрозоля примерно от 500 до 50 000 частиц на литр воздуха внутри камеры. 17.8.1.4 Методология испытания на воздействие аэрозоля

Рис. 17.9 является иллюстрацией одного из наших аэрозольных экспозиции камеры, которая имеет размеры 36 × 17 × 14 дюймов и объем 0.14 м³. Частицы с одной спорой были получены с помощью распылителя Collison, а биокластеры были получены с помощью ультразвуковых распылительных форсунок Sono-Tek. После образования аэрозоля воздух в камере перемешивали для получения однородной концентрации аэрозоля. Исходную пробу воздуха отбирали на гелевых фильтрах до воздействия ультрафиолета. Затем организмы подвергались воздействию ультрафиолетового света в течение различной продолжительности времени. В конце каждого воздействия пробы воздуха отбирали с помощью гелевых фильтров. Контрольные образцы собирали аналогичным образом, но без облучения ультрафиолетовым светом (при выключенном ультрафиолетовом свете). Количество погибших в результате воздействия ультрафиолета определяли путем сравнения исходных образцов с образцами, подвергнутыми воздействию ультрафиолетового излучения, и контрольными образцами (King, Kesavan, and Sagripanti, 2011).

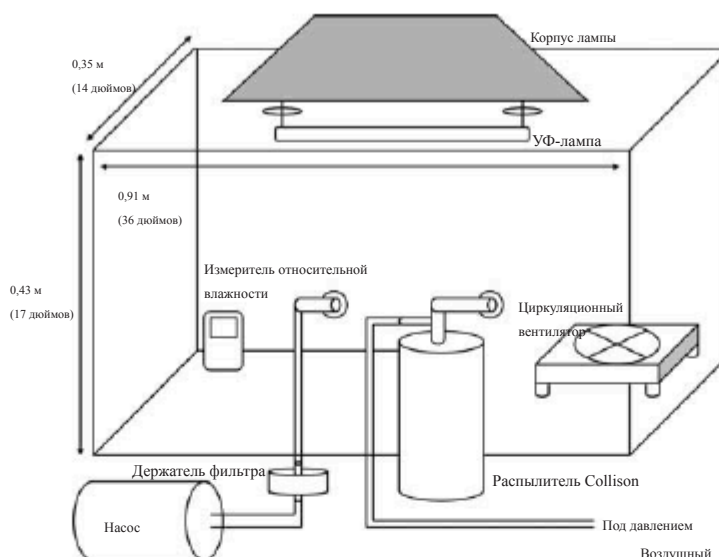


Рисунок 17.9 Камера для воздействия аэрозолями. Впервые опубликовано в журналах King, Kesavan и Sagripanti. (2011).

17.9 Обсуждение

Непреднамеренный выброс биоаэрозолей инфицированными пациентами вызывает озабоченность у населения здравоохранения, а крупномасштабный преднамеренный или случайный выброс аэрозольных микроорганизмов вызывает озабоченность у биологической защиты. Разбавление и направленная вентиляция снижают риск за счет уменьшения концентрации микроорганизмов и удаления микроорганизмов, но эти методы не убивают микробы. Технология фильтрации воздуха позволяет уменьшить количество инфекционных организмов в помещении, с высокоэффективной фильтрацией твердых частиц воздуха (HEPA), удаляющей > 99,99% находящихся в воздухе частиц попадают в фильтрующий материал, но внедрение HEPA-фильтрации часто требует дорогостоящих инженерных модификаций. Среди доступных технологий обеззараживания воздуха и поверхностей наиболее перспективной может быть дезинфекция УФ-С, поскольку она относительно проста в использовании и высокоэффективна. Кроме того, Лампы UV-C могут быть установлены в зданиях за небольшую часть стоимости систем фильтрации HEPA. Как показывают исследования, обобщенные в этом отчете, необходимо соблюдать осторожность для получения точных показателей чувствительности микроорганизмов к ультрафиолетовому излучению. Однако, как только будут доступны точные измерения чувствительности микроорганизмов, исследователи и инженеры смогут использовать эти данные в широком спектре приложений. Использование ультрафиолетового излучения для инактивации микробов, взвешенных в аэрозолях или нанесенных на поверхности, должно позволить разрабатывать точные и эффективные инженерные решения для защиты здоровья и жизни. Понимание влияния естественного солнечного света на микробы, переносимые воздушно-капельным путем, должно помочь в понимании и, следовательно, прогнозировании распространения микробов и его роли в естественных и искусственных эпидемиях.

Список литературы.

- Беккер М.М. и Ван З. (1989) В -А-переходы в гене 5s рибосомальной РНК
в высокой степени зависят от последовательности. *Журнал биологической химии.*, 264(7), 4163 - 4167.

- Биб, Дж.М., Дорси, Э.Л., Гузе, Д.Г. и Хант, Г.Р. (1962) Взаимосвязь стабильности и вирулентности-Переносимых воздушно-капельным путем *Bacillus anthracis* Споры размножаются под воздействием света и влажности. Технический меморандум 18, Биологические лаборатории армии США, Форт Детрик, Мэриленд. Бен-Давид, А. и Сагрипанти, Дж.-Л. (2010) Модель инактивации микробов во взвешенном состоянии. в атмосфере под действием солнечного ультрафиолетового излучения. *Фотохимия и фотобиология*, **86**, 895-908.
- Корпорация Блэка и Витча (2010) *Справочник Уайта по хлорированию и альтернативным средствам Дезинфицирующие средства*, 5-е издание, John Wiley & Sons, Inc, Хобокен, Нью-Джерси.
- Блок, S.S. (2001) *Дезинфекция, стерилизация и консервирование*, 5-е издание, Липпинкотт Уильямс и Уилкинс, Филадельфия, Пенсильвания.
- Черутти, П.А., Миллер, Н., Плейсс, М.Г. *et al* . (1969) Фотогидратация уридина в РНК колифага R17 I. Восстановительный анализ фотогидратации уридина. *Биохимия*, **64**, 731-738. Кухилл Т.П. (1986) Взаимодействия вирусных клеток как зонды для ослабления вакуумного ультрафиолетового излучения-старение и восстановление. *Фотохимия и фотобиология*, **44**, 359 -363.
- Кухилл, Т.П. и Сагрипанти, Дж.-Л. (2008) Обзор инактивации ультразвуком с длиной волны 254 нм.-олетное излучение бактерий с особым значением для биологической защиты. *Фотохимия и фотобиология* , **84**, 1084-1090. Кухилл, Т.П. и Сагрипанти, Дж.-Л. (2009) Обзор: инактивация бактерий солнечным ультрафиолетом сравнение чувствительности к излучению с длиной волны 254 нм. *Фотохимия и фотобиология*, **85**, 1040-1045.
- Кокс, Р.Б. (1995) Ортомиксовирусы, в разделе *Медицинская микробиология*, 4-е издание, Университет Медицинское отделение Техаса, Галвестон, Техас, стр. 1-22.
- Филдс, Б.Н. и Найп, Д.М.н. (ред.) (1990) *Филдсовская вирусология*, 2-е издание, Raven Press, Нью-Йорк .
- Найп, д.М.н. и Хаули, П.М. (2001) *Филдсовская вирусология*, 4-е издание, Липпинкотт Уильямс и Уилкинс, Филадельфия, Пенсильвания.
- Фоард, К., Франке, Д., Уэббер, Т. *et al*. (2006) Отчет об оценке технологии: Биологический Эффективность отключения с помощью встроенных систем ультрафиолетового излучения HVAC, Агентство по охране окружающей среды США, Управление исследований и разработок, Исследовательский центр Национальной внутренней безопасности. Гиз, А.К. (1976) *Жизнь в ультрафиолетовых лучах нашего Солнца*, Plenum Press, Нью-Йорк.
- Ханавальт, П.К. (1989) Концепции и модели репарации ДНК: из *Escherichia coli* за мам-малышские ячейки. *Экологический и молекулярный мутагенез*, **14**(16), 90 - 98.
- Хейслер Г.М., Грант Р.Х., Гао У. и Слуссер Дж.Р. (2004) Солнечное ультрафиолетовое излучение класса В в городских условиях: случай Балтимора, штат Мэриленд. *Фотохимия и фотобиология* , **80**(3), 422-428. Хеммс, Дж.Х., Винклер, К.К. и Кул, С.М. (1960) Выживание вируса как сезонный фактор при грипп и полиомиелит. *Природа*, **188**, 430- 431.
- Хике, Дж.А., Слуссер, Дж., Ланц, К. и Паскуаль, Ф.Г. (2008) Тенденции и межгодовые колебания-способность к поверхностному ультрафиолетовому излучению в течение 8-11 лет наблюдалась по всей территории Соединенных Штатов. *Журнал геофизических исследований*, нз , D21302. Джаггер, Дж. (1985) *Воздействие солнечного ультрафиолета на живые клетки*, Прегер, Нью-Йорк. Кинг Б., Кесаван Дж. и Сагрипанти Дж.-Л. (2011) Бактерицидная чувствительность бактерий к ультрафиолетовому излучению в аэрозоли и на загрязненных поверхностях. *Наука и технология в области аэрозолей*, **45**, 645 - 653.

- Ко, Г., Мелвин, Ф.В. и Бердж, Х.А. (2002) Характеристика ультрафиолетового бактерицидного облучения в верхних помещениях-фиолетовое бактерицидное облучение при инактивации микроорганизмов, находящихся в воздухе. *Окружающая среда перспективы здоровья*, **110**(1), 95- 101. Kowalski, W. (2009) *Руководство по ультрафиолетовому бактерицидному облучению: UVGI для дезинфекции воздуха и поверхностей-дезинфекция лица*, Спрингер, Нью-Йорк. Кратц, Р.
- Фо. (2005) *Электронная микробиология Баррона*, Образовательная серия Wagon's, Нью-Йорк.
- Лин, С. и Ли, С. (2002) Контролируют эффективность ультрафиолетового бактерицидного облучения на биоаэрозолях. *Наука и технология аэрозолей*, **36**(4), 474- 478.
- Любин Д. и Дженсен Э.Х. (1995) Влияние облаков и разрушения стратосферного озонового слоя на тенденции ультрафиолетового излучения. *Природа*, **377**, 710- 713.
- Литл, Округ Колумбия, и Сэгрипант, Дж.-Л. (2005) Предсказали инактивацию вирусов, имеющих отношение к биологической защите от солнечной радиации. *Журнал вирусологии*, **79**(22), 14244 - 14252.
- Masschelein, И. В. и риса, Р. (2002) *Ультрафиолетовое излучение в области водоснабжения и очистки сточных вод Санитации*, CRC Press, Бока-Ратон, Флорида.
- Макдевитт, Дж.Дж., Лай, К.М., Рудник, С.Н. *et al.* (2007) Характеристика чувствительности к ультрафиолетовому излучению активность вируса коровьей оспы. *Прикладная микробиология и экологическая микробиология* **73** (18), 5760-5766.
- Маклин Р.Л. (1956) Комментирует снижение эпидемии гриппа среди госпитализированных ветеринаров путем ультрафиолетового облучения капель в воздухе. *Американский обзор респираторных заболеваний*, **83**(Дополнение), 36-38.
- Менетрез, М.Ю., Фоард, К.К., Уэббер, Т.Д. *et al.* (2006) Эффективность ультрафиолетового облучения на восьми видах *Bacillus*. *Журнал экологической инженерии и науки*, **5**, 329-334. Мензис Д., Попа Дж., Хэнли Дж.А. *et al.* (2003) Влияние ультрафиолетовых бактерицидных ламп, установленных в системах вентиляции офисов, на здоровье и самочувствие работников: двойное слепое многократное перекрестное исследование. *Lancet*, **362**, 1785-1791.
- Миллер С.Л. и Махер Дж.М. (2000) Оценка методологии количественной оценки влияние ультрафиолетового бактерицидного облучения воздуха в помещении на бактерии, находящиеся в воздухе. *Наука об аэрозолях и технология*, **33**, 274-295.
- Мимс, Ф.М. (2005) Птичий грипп и УФ-В блокируются дымом от биомассы. *Окружающая среда Перспективы здоровья*, **113**(12), A806 - A807.
- Меллер Р., Хорнек Г., Фацкус Р. и Стакебрандт Э. (2005) Роль пигментации в защита *Эндоспор Bacillus* sp от ультрафиолетового излучения окружающей среды. *Микробиологическая экология FEMS*, **51**, 231-236.
- Мунаката, Н. (1999) Сравнительные измерения солнечного ультрафиолетового излучения с дозой спор-попробуйте на трех европейских и двух японских объектах. *Журнал фотохимии и фотобиологии В*, **53**, 7-11. Мунаката, Н., Казадзис, С., Баис, А.Ф. *et al.* (2000a) Сравнение споровой дозиметрии и спектральной фотометрии солнечного УФ-излучения на четырех объектах в Японии и Европе. *Фотохимия-история и фотобиология*, **72**(6), 739-745.
- Мунаката, Н., Макина, К., Болси, Д. *et al.* (2000b) Споровая дозиметрия солнечного УФ-излучения: приложения для мониторинга суточной освещенности и личного облучения. *Достижения в области космических исследований*, **26** (12), 1995- 2003. Николсон В.Л. и Галеано Б. (2003) Устойчивость к ультрафиолетовому излучению *Bacillus anthracis* пересмотренные споры-проверено: проверка *Bacillus subtilis* споры как УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ заменители спор *B. anthracis* Sterne. *Прикладная микробиология и экология окружающей среды*, **69**(2), 1327-1330.

- Николсон В.Л., Сетлоу Б. и Сетлоу П. (2002) УФ-фотохимия ДНК in vitro и в *Сенная палочка* споры по земле, окружающей среды и низкое атмосферное давление: implications для Spore выживания на других планетах или лунах Солнечной системы. *Астробиология*, 2, 417-425. Печка
- Дж. и Эрнандес М. (2001) Фотореактивация в воздушно-капельном режиме *Mycobacterium paraformosum*. *Прикладная микробиология и экологическая микробиология*, 67(9), 4225-4232.
- Пушкеппелайт, М., Квинтерн, Л.Э., Наггар, С. Е. et al (1992) Долговременная дозиметрия солнечного излучения УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ излучение в Антарктиде с использованием спор *Bacillus subtilis*. *Прикладная и экологическая микробиология*, 58(8), 2355-2359.
- Раут, А.М. (1965) Физическое состояние вирусной нуклеиновой кислоты и чувствительность вирусов к ультрафиолетовому излучению. *Биофизический журнал*, 5, 257 -273.
- Ремсен, Дж.Ф., Миллер, Н. и Черутти, П.А. (1970) Фотогидратация уридина в РНК колифага R17 II. Взаимосвязь между ультрафиолетовой инактивацией и фотогидратацией уридина. *Труды Национальной академии наук Соединенных Штатов Америки*, 65(2), 460-466. Ризенман П.Дж.
- и Николсон В.Л. (2000) Роль слоев споровой оболочки у *Bacillus subtilis* устойчивость к спорам с перекисью водорода, искусственному УФ-С, УФ-В и солнечному УФ излучению. *Прикладная микробиология и экология окружающей среды*, 66 (2), 620-626. Рутала В.А., Герген М.Ф. и Вебер Д.Дж. (2010) Обеззараживание помещений УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ излучением. *Инфекционный контроль и госпитальная эпидемиология*, 31(10), 1025 - 1029.
- Сагрипанти, Дж.-Л. и Литл, К.Д. (2007) Инактивация вируса гриппа солнечным излучением. *Фотохимия и фотобиология*, 83, 1278 - 1282.
- Schreier, W.J., Schrader, T.E., Koller, F.O. et al. (2007) Димеризация тимина в ДНК - это сверхбыстрая фотореакция. *Наука*, 315(5812), 625-629.
- Сетлоу, П. (2003) Прорастание спор. *Современное мнение в микробиологии*, 6, 550 - 556. Сетлоу, П. (2006) Споры *Bacillus subtilis* : их устойчивость к радиации и уничтожение ею, нагревание и химические вещества. *Журнал прикладной микробиологии*, 101, 514 - 525.
- Сигал, Дж.Д., Райнхарт, Э., Джексон, М. и Чиарелло, Л.: инфекция здравоохранения. Консультативный комитет по практике контроля (2007) Руководство по мерам предосторожности при изоляции : предотвращение передачи инфекционных агентов в медицинских учреждениях, <http://www.cdc.gov/hicpac/2007IP/2007isolationPrecautions.html> (последняя получить доступ 12 августа 2013 г.). ТБ-контроль указаний рабочей группы (1994) руководства по предотвращению транс-миссии *Микобактерии* туберкулез в медицинских учреждениях. *Еженедельный отчет о заболеваемости и смертности- ity*, 43(RR-13), 1-132. Ценг С. и Ли С. (2007) Инактивация вирусов на поверхностях ультрафиолетовым бактерицидным облучением. *Журнал гигиены труда и окружающей среды*, 4, 400-405.
- Такер Дж.Б. и Жилинскас Р.А. (2003) Вспышка оспы в 1971 году в советском городе Аральск: значение вируса натуральной оспы как биотеррористической угрозы. *Критические обзоры в области микробиологии*, 29, 81 - 95. Агентство по охране окружающей среды США (2010) Исследование искусственного воздействия солнечного света на Инактивацию *B. anthracis* и *B. subtilis* о материалах, размещенных на открытом воздухе, Отчет EPA /600/ R- 10/048, Управление исследований и разработок, Национальный исследовательский центр внутренней безопасности , Вашингтон, Округ Колумбия.

- Сюй, П., Куяндзич, Э., Печча, Дж. *et al.* (2005) Влияние факторов окружающей среды на эффективность ультрафиолетовое бактерицидное облучение воздуха в верхних помещениях для инактивации микобактерий, переносимых воздушно-капельным путем. *Наука и технология в области охраны окружающей среды.*, **39**, 9656-9664.
- Сюй П., Печча Дж., Фабиан П. *et al*(2003) Эффективность ультрафиолетового бактерицидного облучения воздух верхних помещений для инактивации бактериальных спор и микобактерий, переносимых по воздуху, в полномасштабных исследованиях. *Атмосферная среда*, **37**, 405-419.
- Сюз Ю. и Николсон В.Л. (1996) Два основных пути репарации днк в спорах - нуклеотидный эксцизионная репарация и лиаза, образующая фотопродукты спор, достаточны для устойчивости *Bacillus subtilis* устойчивы к искусственному УФ-С и УФ-В, но не к солнечному излучению. *Прикладная и экологическая микробиология*, **62** (7), 2221 - 2227.

Радиоактивные аэрозоли: Индикаторы Атмосферных процессов

Кацуми Хироэ

*Кафедра материалов и наук о жизни, факультет науки и технологий,
Софийский университет, Япония*

18.1 Введение

Выбрасываемые в атмосферу радионуклиды, которые имеют газообразную форму и содержат мелкие частицы, превращаются в радиоактивные аэрозоли в результате преобразования газа в частицы и коагуляции. Взаимодействие этих радиоактивных аэрозолей с окружающей средой изучалось с точки зрения радиологических эффектов и атмосферных индикаторов (Чемберлен, 1991; Папастефану, 2008). Деятельность человека влияние на атмосферную среду через повышение Эмис- сией антропогенных загрязнителей, в том числе природных и техногенных радионуклидов. Общественный интерес к радиоактивным аэрозолем возник в середине 1950-х годов, когда впервые были замечены глобальные радиоактивные осадки продуктов деления в результате испытаний ядерного оружия..... Термоядерные испытания на атолле Бикини (испытание Браво) в 1954 году оказали радиологическое воздействие на здоровье человека в виде выпадения радиоактивного пепла. Аварии на ядерных реакторах, такие как Windscale, Three Mile Island, Чернобыль и Фукусима, вызвали выброс в атмосферу большого количества радиоактивных аэрозолей. Природные радионуклиды, как правило, радон и продукты его распада, также представляют потенциальную опасность для здоровья человека из-за воздействия на них урана и других рудников. Для оценки радиологического воздействия антропогенных и природных радионуклидов важно выяснить поведение радиоактивных аэрозолей в окружающей среде.

Радиоактивные аэрозоли использовались для определения показателей атмосферных процессов, включая отслеживание источника и перенос, влажное и сухое осаждение, время пребывания и другие (Юнге, 1963; Варнек, 1988; Чемберлен, 1991). Природные радионуклиды, особенно

производные радона и Ве широко ⁷использовались для выяснения аэрозольных атмосферных процессов (Папастефану, 2008; Баскаран, 2011). Антропогенные радионуклиды, обнаруженные в аэрозолях, являются мощными индикаторами переходного процесса, которые позволяют лучше понять поведение аэрозолей в атмосфере, особенно рассеивание радиоактивных облаков в результате ядерных аварий, позволяя идентифицировать их источники, включая процессы выбросов. В этой главе мы исследуем атмосферные процессы, связанные с радиоактивными аэрозолями.

18.2 Происхождение радиоактивных аэрозолей

18.2.1 Природные радионуклиды

Природные радиоактивные аэрозоли могут быть отнесены к следующим категориям: (i) радиоактивные аэрозоли, связанные с радиоактивными нуклидами космического происхождения, такими как ⁷Ве, и ²²Na, ³²P, (ii) аэрозоли, связанные с продуктами распада радона и торона; и (iii) земные материалы, такие как кварц, уран и торий.

Типичные космогенные радионуклиды, обнаруживаемые в аэрозолях, включают нуклиды с относительно коротким периодом полураспада: ⁷Ве (53,3 дня), ³²P (14,3 дня), ³³P (25,3 дня), и ³⁵S (84,7 дня); и нуклиды с более длительным периодом полураспада: ¹⁰Be (1,5 × 10⁶ лет), ²²Na (2,6 года), ²⁶Al (7,17 × 10⁵ лет), ³²Si (280 лет) и ³⁶Cl (3,01 × 10⁵ лет). В атмосфере обнаружены другие космогенные радионуклиды, которые в основном существуют в газообразной форме: ³H (12,5 лет), ¹⁴C (5730 лет), и ³⁹Ar (269 лет). Они образуются в стратосфере и

верхней тропосфере в результате взаимодействия частиц космических лучей с компонентами атмосферы. Большинство из них образуются в результате процессов расщепления легких атмосферных ядер, таких как азот, кислород и углерод, или более тяжелых ядер, таких как натрий, фосфор, сера, калий и кальций (NCRP, 1987). Приведены средние мировые показатели производства и концентрации космогенных радионуклидов в атмосфере

в таблице 18.1. Среди космогенных радионуклидов, ⁷Ве широко используется в качестве атмосферный индикатор из-за его высокой производительности (8,1 × 10⁻² атомы, см⁻² s⁻¹) и гамма-излучатель (477,6 кэВ), который можно легко обнаружить и измерить в пробах атмосферы. Скорость его образования зависит от интенсивности космических лучей, которая находится в обратной зависимости от

Таблица 18.1 Скорости образования и концентрации космогенных радионуклидов в атмосфере (НКАР ООН, 2000). Радионуклиды

	Уровень		Глобальный перечень (PBq)	Концентрации в тропосфере (мБк м ⁻³)
	производства на единицу площади (атомы м ⁻² s ⁻¹)	годовой объем (PBq год ⁻¹)		
⁷ Ве	810	1960	413	12.5
¹⁰ Be	450	6.4 × 10 ⁻⁵	230	0.15 0.0021
²² Na	0.86	0.12	0.44	1.5
²⁶ Al		0.1 × 10 ⁻⁵	0.71	× 10 ⁻⁸
³² Si	1.4	~8.7 10 ⁻⁶	0.82	2.5 × ⁻⁵ 10
³³ P	1.6	73	4.1	0.27
³⁵ S	8.1	35	3.5	0.15
³⁶ Cl	6.8	21	7.1	0.16
	14 11	~1.3 10 ⁻⁶ ×	5.6	9.3 × ⁻⁸ 10

вариации солнечных пятен. Темпы производства ^{70}Be варьируются примерно на 25% в зависимости от 11-летнего солнечного цикла. Другие радионуклиды, упомянутые в этой главе, в основном являются бета-излучателями, с низким уровнем образования в атмосфере и, следовательно, очень низкими концентрациями в окружающей среде.

тропосфера. Для аэрозолей, содержащих ^{70}Be , средние аэродинамические диаметры активности (AMAD) находятся в диапазоне от 0,33 до 1,18 мкм (Бондиетти и Брэнтли, 1986; Папастефану и Иоаниду, 1995; Винклер *et al.*, 1998; Ю и Ли, 2002; Порстендорфер и Грюндель, 2003). Примечательно, что существует значительный вклад ресуспендирования отложившихся на поверхности суши радионуклидов в образование долгоживущих космогенных радионуклидов.

Газообразный радон (^{222}Rn , период полураспада: 3,82 дня) и торон (^{220}Rn , период полураспада: 55,6 секунды) в атмосфере образуются продукты распада урана и тория соответственно, которые выделяются из почвы и горных пород, при этом меньшее количество радона выделяется из океана. Таким образом, радон является индикатором континентальной воздушной массы. Изотопы радона, выбрасываемые с поверхности земли, рассеиваются и адвектируются в атмосфере и производят потомство (полоний, радиоактивный висмут и радиоактивный свинец) в результате радиоактивного распада. Короткоживущие потомки

из ^{222}Rn являются ^{218}Po (период полураспада: 3,05 минуты), ^{214}Pb (26,8 минуты) и ^{214}Bi (19,7 минуты), принимая во внимание, что большинство радионуклидов цепочки радона очень недолговечны (менее

^{212}Pb (10,64 часа) и 1 минута), за исключением ^{210}Pb (138,4 дня). Долгоживущий радионуклид ^{210}Pb (22,2 в то, что цепочка распада ^{210}Pb распада). ^{210}Pb также является индикатором континентальной воздушной массы.

(Турекия и Кокран, 1981). Хотя большая часть атмосферных ^{210}Pb - это радон, находящийся в воздухе

^{210}Pb содержит вклады из других источников, таких как ресуспендирование депонированный ^{210}Pb потомства, аэрозоль ^{210}Pb и почвенный ^{210}Pb , а также сжигание биомассы (Hirose *et al.* ^{210}Pb , 2011). Потомки ^{210}Pb

^{210}Po (138,4 дня) - также важны для выяснения ^{210}Pb , то есть, ^{210}Bi (5,012 дня) и ^{210}Po поведение аэрозолей в атмосфере. Потомки радона, которые образуются в виде положительных ионов, присоединяют субмикронные частицы - так называемые "ядра конденсации" - в воздухе. В приземном воздухе, амады из ^{210}Pb Частицы, содержащие ^{210}Pb , варьируются от 0,28 до 0,77 мкм (Санак, Годри и Ламберт, 1981; Винклер *et al.*, 1998; Porstendörfer and Gründel, 2003).

Основные изотопы урана (^{238}U Ед., $4,47 \times 10^9$ лет) и торий (^{232}Th , $1,41$

находящаяся в воздухе пыль и дождевая вода имеют литогенное происхождение; места эксплуатации урановых рудников являются распространенными источниками частиц, содержащих уран и торий (Martin, 2003). Таким образом, уран и торий в дождевой воде и пыли, переносимой по воздуху, в первую очередь являются индикаторами почвенной пыли и загрязненных частиц почвы в результате деятельности человека. С другой стороны, значительные количества урана и тория также выбрасываются в атмосферу в результате промышленной деятельности, такой как сжигание угля. Частицы летучей золы значительно обогащены несколькими радионуклидами (Тадмор, 1986; Колб, 1989). В дополнение к основным изотопам урана и тория, несколько долгоживущих изотопов уранового и ториевого рядов также были обнаружены в

дождевой воде и частицах, находящихся в воздухе; для урана: ^{234}U (^{234}U (период полураспада: $7,04 \times 10^5$ лет) и ^{234}Th (24,1 дня), относящийся к серии U-238; и

^{230}Th ($7,54 \times 10^4$ лет), потомство для ^{234}Th принадлежит к серии U-238, тория: ^{232}Th (1,41 года), потомство ^{228}Ra (5,75 лет) принадлежит к серии Th-232.

Антропогенные источники, такие как спутники ^{235}U высвобождается в результате атмосферного выгорания ядерного (Krey *et al.*, 1979) и ядерные взрывы ^{235}U (Мацунами и Мамуро, 1975),

вызывает возмущения соотношения изотопов урана, принимая во внимание, что процессы естественного фракционирования в ходе эрозии горных пород могут происходить между потомками урана

и торий; например, ^{238}U и ^{232}Th - соответственно, Т. Следовательно,

соотношения изотопов урана и тория могут предоставить важную информацию об источниках переносимых по воздуху частиц и процессах переноса.

18.2.2 Антропогенные радионуклиды

Антропогенные радионуклиды в аэрозолях состоят из продуктов деления (обычно, ⁹⁰Sr, ⁸⁹Sr, ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ¹³¹I (8,02 дня)) и fis- (период

полураспада: 30,17 года), Sr (28,79 года), Sr (50,53 дня) и силикатные материалы, такие как плутоний. Антропогенные аэрозоли, содержащие радионуклиды, были произведены в результате испытаний ядерного оружия в атмосфере, выгорания спутников, аварий ядерных реакторов и из других источников (НКДАР ООН, 2000).

Антропогенные радионуклиды впервые были выброшены в атмосферу в результате атмосферных ядерных взрывов в Аламогардо (Нью-Мексико, США) и Хиросиме и Нагасаки (Япония) в 1945 году. В период с 1945 по 1980 год США, СССР, Китаем, Францией и Великобританией было проведено 541 испытание ядерного оружия в атмосфере (НКДАР ООН, 2000). Например, испытательный полигон в Неваде в США был местом проведения 86 атмосферных ядерных испытаний с 1951 по 1962 год. Антропогенные радионуклиды, выделяющиеся в результате атмосферных ядерных испытаний, серьезных аварий на ядерных реакторах и из других источников (например, выгорания в атмосфере ядерных спутников), распространены по всему земному шару и обнаруживаются в окружающей среде практически на глобальном уровне (НКДАР ООН, 2000). Основным источником антропогенных радионуклидов в окружающей среде являются испытания ядерного оружия в атмосфере. Пики годового осаднения антропогенных радионуклидов наблюдались в 1963 году на станциях в северном полушарии, сразу после крупномасштабных ядерных испытаний 1961-1962 годов в атмосфере, проведенных США и СССР; максимальное осаднение на станциях в южном полушарии наблюдалось в 1964 году. После заключения Договора об ограниченном запрещении ядерных испытаний в 1963 году атмосферные ядерные испытания были проведены Китаем и Францией. До начала 1980-х годов атмосферные уровни антропогенных радионуклидов в основном поддерживались ядерными взрывами в Китае и Франции.

Другими доминирующими источниками антропогенных радионуклидов в атмосфере являются аварии на ядерных реакторах и ядерных установках; Windscale (Великобритания) в 1957 году, Three Mile Island (США) в 1979 году, Чернобыль (бывший СССР) в 1986 году и АЭС Фукусима-Дайити (атомная электростанция) (Япония) в 2011 году зарегистрированы как крупные аварии на ядерных реакторах. Особенно большое количество радионуклидов было выброшено в атмосферу в результате Чернобыльской аварии и

Аварии на АЭС "Фукусима". В таблице 18.2 приведены расчетные выбросы ⁹⁰Sr, ¹³¹I, ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs (период полураспада: 2,06 года), и ¹⁴⁴Ce (284,9 дня) из испытаний в Неваде, термоядерных испытаний (испытания водородной бомбы), аварии Windscale 1957 года, аварии 1957 года на разделительной установке

Таблица 18.2 Выброс продуктов деления при испытаниях оружия и авариях.

Источник	⁹⁰ Sr (PBq)	¹³¹ I	¹³⁷ Cs (PBq)	¹³⁴ Cs (PBq)	¹⁴⁴ Ce (PBq)
Атмосферные испытания в Неваде (общий выход 1 т)	(PBq) 44 × 10 ³		6-		2 × 10 ²
Все Н-тесты (общий выход 200 ТОНН)	8 × 10 ²	8 × 10 ²	1 × 10 ³	-4 × 10 ⁴	
Авария на ветру		~0.3 × 10 ^{0,9}	0.08	-	~0.01
Химический взрыв в Урал	4	-	0.03	-	50
Три - Майл - Айленд авария	-0.6 × 10 ⁻³		---		
Авария на Чернобыльской АЭС	8	1.8 × 10 ³	86	50	170
Авария на Фукусиме		140	15	18	0.1 × ⁻¹⁰

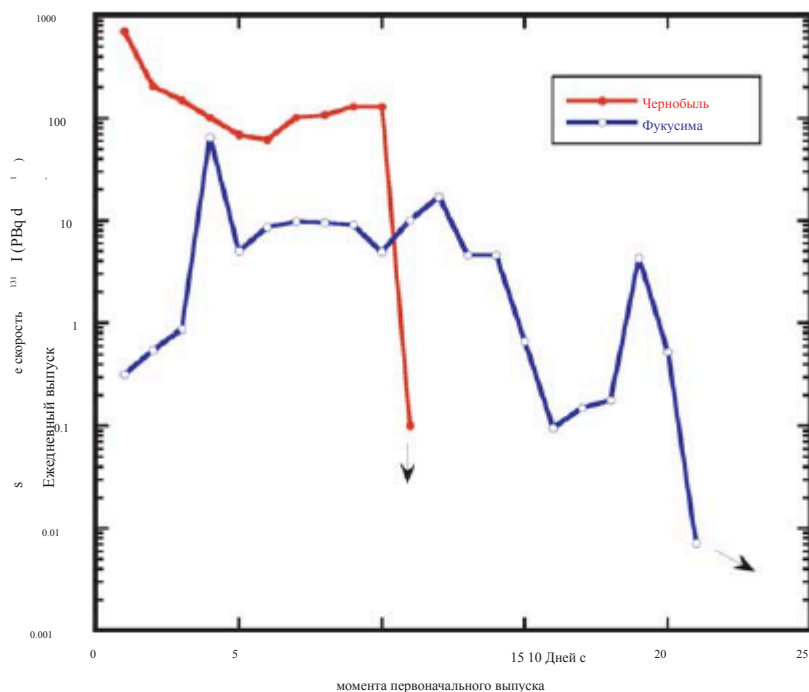


Рисунок 18.1 Временные изменения в ежедневной интенсивности выбросов из ядерных реакторов на Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима Дайичи. Цветную версию смотрите в разделе "Табличка".

на Урале произошла авария на Чернобыльской АЭС 1986 года и авария на Фукусиме 2011 года. На рисунке 18.1 показаны выбросы из Чернобыльской АЭС и АЭС "Фукусима-Дайити".

I^{131} из-за аварии на Чернобыльской АЭС было примерно вдвое меньше, чем из-за испытаний в Неваде, а I^{131} в результате Чернобыльской аварии пострадала щитовидная железа человека в результате ее короткого периода выброса (менее 10 дней); выбросы из Фукусимы было примерно на 3 порядка больше, чем в Чернобыле, но лишь небольшая часть достигла земли, поскольку большая часть распалась в стратосфере.

Трансурановые соединения (обычно изотопы плутония и америция) и U^{235} , которые являются делящимися материалами и продуктами нейтронной реакции, выбрасываются в атмосферу в результате атмосферных ядерных испытаний, аварий на спутниках, запущенных ядерных батарей и реакторов, а также аварий на ядерных реакторах. При атмосферных ядерных взрывах и возвращении ядерных спутников большинство радионуклидов выбрасывается в атмосферу в виде мелких частиц. Более крупные частицы, включая плутоний и около 15 ПБк $^{239,240,238}Pu$ и 0,3 ПБк ^{238}Pu были выброшены в атмосферу в результате атмосферных ядерных испытаний. 0,63 ПБк ^{238}Pu был выброшен в верхние слои атмосферы в результате сгорания американского спутника SNAP-9A в 1964 году. Повторные запуски советских спутников Cosmos 954 в январе 1978 года и Cosmos 1402 в феврале 1984 года (Крей *et al*, 1979; Сакураги, Меасон и Курода, 1983) диспергировали 50 кг мелких частиц U^{235} . В 1950-х годах 20 кг урана было выброшено в атмосферу из реактора Windscale. Следуя за ^{238}Pu , авария на Чернобыльской АЭС, около 6-8 тонн UO_2 и 0,035, 0,03, 0,0024 ~ 6 ПБк от $^{239,240,238}Pu$, соответственно, были выброшены в атмосферу (Викторова и Гаргер, 1990; НКДАР ООН, 2000).

18.3 Индикаторы атмосферных процессов

18.3.1 Транспортировка радиоактивных аэрозолей

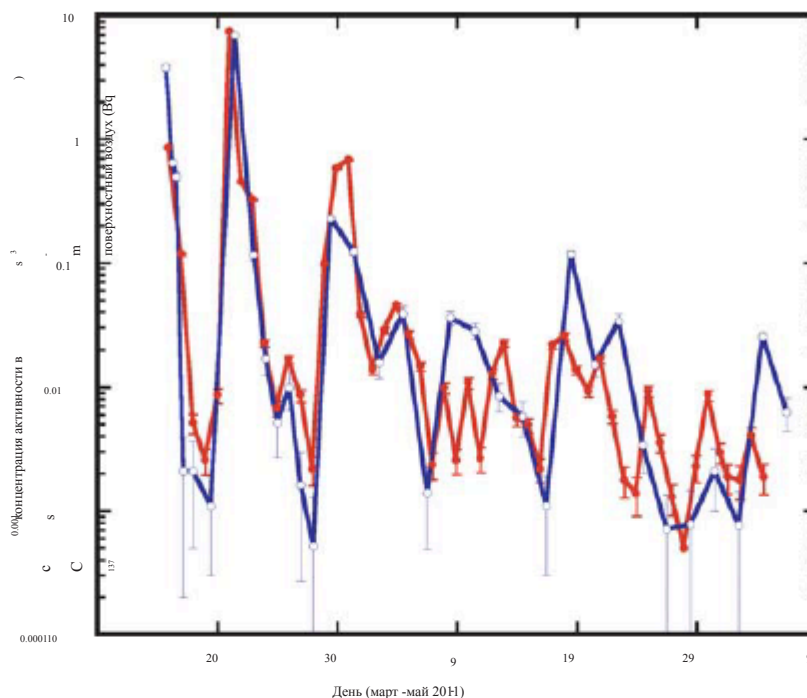
Антропогенные радионуклиды, образующиеся в результате атмосферных ядерных взрывов, вводятся в стратосферу и верхние слои тропосферы; высота введения зависит от масштаба и высоты взрыва (Рейтер и Бауэр, 1975); большинство термоядерных взрывов, проводимых в тропосфере, вводят радионуклиды в стратосферу. Стратосфера представляет научный интерес из-за возможности отслеживания переноса в стратосфере. Аэрозольный слой в стратосфере был впервые описан Юнге и Мэнсоном (1961). Антропогенные радионуклиды, образующиеся в результате ядерного взрыва, немедленно прикрепляются к субмикронному

аэрозоли, хотя некоторые продукты деления изначально присутствуют в газообразной форме (например, ^{137}Xe (период полураспада: 3,818 минуты) $\rightarrow^{137}\text{Cs}$). Стратосферный отбор проб антропогенных радионуклидов показал, что антропогенная радиоактивность, полученная в результате атмосферных ядерных испытаний, сохраняется в стратосфере годами и что радионуклиды связаны с частицами радиусом менее 0,02 мкм на расстояниях более 27 км от поверхности Земли и с частицами радиусом почти 0,1 мкм на расстоянии от 21 км до тропопаузы (Martell, 1966). Изменение распределения частиц, содержащих радионуклиды, по размерам отражает изменение природных аэрозолей в стратосфере; слой сульфатного аэрозоля субмикронного радиуса существует на высоте около 21 км (Юнге и Мэнсон, 1961). Что касается тропосферной циркуляции, то циркуляция пассатных ветров в более низких широтах была успешно прослежена на основе рассеивания радионуклидов, выброшенных в результате испытаний ядерного оружия на поверхности Земли вблизи экватора в 1952 и 1954 годах (Machta, List, and Huber, 1956). Западная циркуляция в средних широтах была прослежена с помощью измерений радиоактивности и анализа воздушной траектории китайского ядерного взрыва в 1965 году (Kuroda, Miyake, and Nemoto, 1965).

Аварии на ядерных реакторах являются типичным примером выброса в нижние слои атмосферы радиоактивных аэрозолей. Большое количество антропогенных радионуклидов было выброшено в нижнюю тропосферу в результате аварии на Чернобыльской АЭС (с 28 апреля по 6 мая 1986 года). В результате в воздухе северного полушария и дождевой воде было обнаружено несколько антропогенных радионуклидов, главным образом в Беларуси, Украине и скандинавских регионах. Большая часть радиоактивности, достигшей Западной Европы, была передана в виде аэрозолей диаметром менее 2 мкм (Jost *et al.*, 1986; Winkelmann *et al.*, 1987). С другой стороны, более крупные частицы, которые содержат более высокую долю тугоплавких элементов, таких как изотопы плутония, достигли Литвы и Скандинавии (Devell *et al.*, 1986; Перссон, Роде и де Гир, 1987). Чернобыль

радиоактивность наблюдалась в воздухе на удаленных объектах. Уровни ^{137}Cs и ^{134}Cs (период полураспада: 2,046 года) в приземном воздухе и дождевой воде, собранных в Цукубе, Япония, в мае 1986 года, а также в отношении летучих короткоживущих радионуклидов (^{131}I (8,02 дня), ^{103}Ru (39,26 дня) и другие), заметно увеличился по сравнению с предыдущим месяцем (Аояма *et al.*, 1986), тогда как плутоний не показал какого-либо заметного увеличения в Японии (Хиросе и Сугимура, 1990), хотя более высокие отложения трансурановых соединений чернобыльского происхождения наблюдались в Восточной Европе (МАГАТЭ, 2006). После Великого Восточно-Японского землетрясения 2011 года на АЭС "Фукусима-Дайити" произошла серьезная авария, в результате которой в атмосферу было выброшено огромное количество радионуклидов.

Окружающая среда. Рис. 18.2 показано временное изменение ^{137}Cs Концентрации ^{137}Cs деятельности в приземном воздухе центральной части Японии в это время. Концентрация в приземном воздухе, полученная в результате аварии на АЭС "Фукусима", сильно варьировалась под влиянием таких факторов, как изменение пути распространения радиоактивного шлейфа и изменение интенсивности выбросов на месте аварии.



137

Концентрации Cs в приземном воздухе при

изменения в производных от Фукусимы Цукуба и Инаге, Япония. Открытый круг: Цукуба, замкнутый круг: Инаге.

Данные приведены Аmano et al. (2012) и Doi et al. (2013). Цветную версию смотрите в разделе "Табличка".

Радиоактивные аэрозоли использовались для проверки результатов имитационных исследований.

Разработана численная модель моделирования для прогнозирования рассеивания радионуклидов,

выбрасываемых в атмосферу в результате аварий на атомных станциях (Imai et al, 1985; Тэрада и Чино,

2008). Важно определить трехмерное распределение в атмосфере и осаждение

радиоактивных аэрозолей с помощью экологического мониторинга, чтобы оценить радиологические эффекты

для населения и окружающей среды, а численное моделирование предоставляет важный

инструмент для оценки локального, регионального и глобального распространения случайно выброшенных

радионуклидов. После аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году для

изучения распределения радионуклидов по Европе были использованы численные модели (например, Hass et al,

1990; Брандт, Кристенсен и Фрон, 2002) и во всем мире (Анспо, Кэтлин и Голдман, 1988).

Рассеивание радионуклидов, полученных на АЭС "Фукусима" в 2011 году, было тщательно изучено

с использованием численного моделирования:

- (i) Имитационные модели использовались для оценки общего количества и истории выбросов

радионуклиды, выброшенные АЭС "Фукусима - Дайити" на основе данных

мониторинга (Chino et al, 2011; Штоль et al., 2011).

• (ii) Для моделирования

рассеивания радиоактивного облака использовались численные модели;

как правило, временные изменения в рассеянии радиоактивного шлейфа в глобальном масштабе

рассчитываются с помощью моделей диффузии и адвекции с использованием метеорологических

данных (Takemura et al., 2011). Численная модель, включающая анализ обратной и прямой

траекторий, смогла воспроизвести, когда радиоактивное облако, образовавшееся на АЭС "Фукусима",

достигло Северной Америки, Европы и Азии (Эрнандес-Себальос et al., 2012; Луханиене

et al., 2012). Моделирование модели регионального масштаба (Huh, Hsu и Lin, 2012) показало, что радиоактивный шлейф, образовавшийся на Фукусиме, преимущественно переносился в направлении юго-запада при фазах северо-восточных ветров в первую неделю, 6-7 апреля 2011 г. • (iii) Были применены численные модели для воспроизведения пространственного распределения осаднения радиоактивных веществ.

полученные из Фукусимы радионуклиды; модели примерно воспроизводили наблюдаемые временные и пространственные распределения радиоактивных отложений в региональном масштабе, хотя поток радиоактивного облака был ограничен топографией суши из-за поверхностных выбросов (Морино, Охара и Нисидзава, 2011; Ясунари *et al.*, 2011).

18.3.2 Сухое осаждение

Сухое осаждение является важным способом удаления радиоактивных аэрозолей. Теоретические и экспериментальные исследования процессов сухого осаждения частиц и газов были проведены и рассмотрены многими исследователями (Чемберлен, 1953; Слинн, 1978; Сехмел, 1980; Андервуд, 2001). Сухое осаждение, которое зависит от условий на поверхности суши (таких как трава, равнина и т.д.) И метеорологических условий, контролируется гравитационным установлением, броуновской диффузией и уплотнением, как и физико-химическая форма радиоактивных аэрозолей. Радиоактивные аэрозоли являются важным инструментом, с помощью которого можно лучше понять процесс сухого осаждения аэрозолей в окружающей среде.

Скорость сухого осаждения была применена для оценки переноса аэрозоля на

поверхность Земли. Скорость сухого осаждения, V_r

определяется как отношение потока сухого осаждения

к концентрации воздуха между суши и поверхностью:

$$V_r = F_r / C_{\text{воздух}} \quad (18.1)$$

где F_r и $C_{\text{воздух}}$ - поток осаждения радиоактивных аэрозолей (Бк м⁻² с⁻¹) и сгущенность (Бк м⁻³) соответственно. Концентрация радиоактивных аэрозолей в воздухе при

скорость зависит от размера частиц и скорости ветра; она увеличивается с уменьшением диаметра частиц при размерах частиц менее 0,1 мкм, которым можно управлять с помощью броуновской диффузии; она минимальна в диапазоне размеров частиц 0,1-1,0 мкм; и она увеличивается с увеличением диаметра частиц при размерах частиц более 1 мкм, где формой возрастающей кривой управляют соударение и гравитационное осаждение. Скорость гравитационного оседания частиц почвы, по расчетам, составляет около 1×10^{-3} при среднем размере частиц 7 мкм и плотности частиц около $1,5 \text{ г см}^{-3}$, что является минимальным значением, поскольку скорость сухого осаждения увеличивается в результате скорости трения и состояния поверхности (Sehmel, 1980).

Скорости сухого осаждения радиоактивных аэрозолей были определены методом полевых наблюдений.

Они зависят от типа радионуклида и изотопа; для частиц, содержащих Be, скорость сухого осаждения варьируется в пределах $1,0 \times 10^{-3}$ до $3,4 \times 10^{-2} \text{ мс}^{-1}$ (Чемберлен,

1953; Смолл, 1960; Пирсон *et al.*, 1973; Янг и Силкер, 1980; Турекян, Беннингер и Дион, 1983; Тодд *et al.*, 1989; Папастефану *et al.*, 1995; Рознер, Хотци и Винклер, 1997;

Макнери и Баскаран, 2003). Частицы, содержащие Pb, варьируются от $0,7 \times 10^{-2}$ до $1,1 \times 10^{-2} \text{ мс}^{-1}$ (Турекян *et al.*, 1983; Тодд *et al.*, 1989; Макнери и Баскаран, 2003);

и для ¹³⁷Cs, варьируются от $3,8 \times 10^{-4}$ до $6,3 \times 10^{-2} \text{ мс}^{-1}$ (Аояма, Хиросе и Такатани, 1992; Папастефану *et al.*, 1995; Рознер *et al.*, 1997). Amano *et al.*

(2012) определили скорости сухого осаждения отходов, полученных на АЭС "Фукусима".

¹³⁷Cs в период с 14 по 17 марта составит около 2×10^{-3} до $3 \times 10^{-3} \text{ мс}^{-1}$ для ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs и 1×10^{-3} до $3 \times 10^{-3} \text{ мс}^{-1}$ для ¹³¹I. Скорости сухого осаждения тория

изотопы варьировались от $3,8 \times 10^{-3}$ до $4,0 \times 10^{-2}$ мс^{-1} (Хироэ, 2000) и от $2,0 \times 10^{-3}$ до $6,4 \times 10^{-2} \text{ мс}^{-1}$ за тот же период (Крецелиус *et al.*, 1978). Для

18.3.3 Влажное осаждение

Основным путем осаждения естественной радиоактивности в атмосфере является поглощение радионуклидов является полезным инструментом

осадков. Скорость влажного осаждения (V) для выяснения процессов удаления радионуклидов влажным способом (а также скорости осаждения сухим способом, который рассчитывается исходя из потока мокрого осаждения (R : $\text{Вк м}^{-2} \text{ с}^{-1}$) и концентрация приземного

воздуха ($C_{a,R}$: Вк м^{-3}) радионуклидов с использованием уравнения $V_{\text{влажный}, R} = R D / C_{a,R}$ (18.1). Скорости

влажного осаждения радиоактивных аэрозолей значительно различаются и зависят от типа радионуклидов и осадков (Hirose, 2000). Коэффициенты вымывания обычно используются для описания процессов мокрого удаления атмосферных загрязнителей (Englemann, 1971; Bagrie, 1985). Скорость мокрого осаждения может быть рассчитана из:

$$V_{\text{мокрый } R} = W I_R \quad (18.2)$$

где I_R - скорость выпадения осадков (мм в час^{-1}), а W - коэффициент вымывания (или коэффициент продуктивности). Коэффициент вымывания определяется как отношение концентрации к объему осадков (C : Бк м^{-3}) к концентрации в приземном воздухе ($C_{a,R}$: Вк м^{-3}): $C / C_{a,R}$. Следует отметить, что коэффициент вымывания, в отличие от коэффициента вымывания, в формуле (18.2) находится ли объемные осадки (Бк м^{-3}) и приземного воздуха (Бк м^{-3}) и представляет собой плотность воздуха при стандартных условиях ($1,2 \text{ кг м}^{-3}$ при 20°C и 760 мм рт. ст.) (Макнери и Баскаран, 2003). Далее-

устанавливается наименьшая зависимость между различными определенными коэффициентами вымывания: $W = 10^3 W / \rho$ (18.3)

Коэффициенты вымывания природных и антропогенных радионуклидов для отдельных осадков событий обычно бывает порядка 10^6 ; коэффициенты вымывания ^{232}Ce , ^{230}Ce , и ^{228}Th варьируются от $0,13 \times 10^6$ до $3,2 \times 10^6$, от $0,087 \times 10^6$ до $1,9 \times 10^6$, и от $0,16 \times 10^6$ до $4,6 \times 10^6$, соответственно (Хироэ, 2000); Харви и Мэтьюз (1989) дают значение $0,92 \times 10^6$ для Be , в то время как Макнери и Баскаран (2003) дают значения от $0,18 \times 10^6$ до $1,7 \times 10^6$ в среднем $0,79 \times 10^6$ для Be и от $0,046 \times 10^6$ до $1,9 \times 10^6$ в среднем $0,53 \times 10^6$ для ^{210}Pb . Для антропогенных радионуклидов (1×10^6) производный от атмосферные ядерные испытания (Slinn, 1978) и чернобыльская радиоактивность, ^{137}Cs : $0,19 \times 10^6$ до $0,53 \times 10^6$ для ^{90}Sr : $0,16 \times 10^6$ до $0,37 \times 10^6$, и ^{90}Sr : $0,50 \times 10^6$ до $1,4 \times 10^6$ (Хироэ, Такатани и Аояма, 1993).

Коэффициент вымывания атмосферных аэрозолей зависит от метеорологических, физических и химических факторов. С теоретической точки зрения (Slinn, 1978; Harvey and Matthews, 1989), прогнозируется слабая зависимость коэффициента вымывания от количества осадков.:

$$W = a III^{-b} \quad (18.3)$$

где a и b - постоянные. Для изотопов тория коэффициенты вымывания были коррелированы с учетом количества осадков; значения a и b для ^{232}Ce , ^{230}Ce , и ^{228}Th оцениваются как $0,67 \times 10^6$ и $0,69, 0,43 \times 10^6$ и $0,72$, и $0,88 \times 10^6$ и $0,81$ соответственно (Хироэ, 2000).

коэффициент размыва Чернобыльской аэрозоль ^{90}Sr , АМАД которого составлял около 1 мкм , по-видимому, зависел от количества осадков: $b = 0,22$ (Hirose *et al.*, 1993). С другой стороны, коэффициенты вымывания для ^{137}Cs и ^{103}Ru в чернобыльской зоне радиоактивности были почти независимыми от количества осадков. Постоянство коэффициента вымывания наблюдалось для Be (Харви и Мэтьюз, 1989). Примечательно, что ^{137}Cs и ^{103}Ru в Чернобыльской радиоактивности

(диапазон: 4,4- 32,0 мБк г⁻¹, неопубликованные данные). В

примерно ниже среднего значения

²³²

-Я специфическая активность в осаднении -Я концентрация

²³²

в поверхностном слое почвы, поскольку почва

²³⁰

Частицы с активностью Th занимают

соотношения варьируются в зависимости от источников, причем они высоки на местных возделываемых полях из-за

внесения удобрений и низки на засушливых и пустынных почвах; поэтому их можно использовать для дифференциации

между локально и удаленно производными

Й (Хиросе *et al.*²³², 2010).

²³⁰

-Й/²³²

Коэффициенты активности Th в обр

аэрозоля и отложений демонстрируют большую изменчивость, при этом встречаются высокие коэффициенты

ранней весной. Эти высокие

²³⁰

-с/²³²

Коэффициенты Th можно объяснить локальными пыльными бурями, которые

вызывает ресуспендирование почв с возделываемых полей.

²³⁰

Коэффициенты Th в отложениях Th/²³²

также позволяют нам разделять локальные и удаленные значения

²³²

Th дробы. Результаты показывают

которые как локально, так и удаленно получены

²³²

Отложения Th демонстрируют сезонные

колебания с максимумами весной, хотя удаленная фракция доминирует над локально полученной

полученный один. Полученный локально

²³²

Отложение Th показывает пик ранней весной, который может

могут быть отнесены к событиям местной пыльной бури. В

²³²

Максимальный уровень отложений

позже весной связан с фракцией, полученной дистанционно, соответствующей

событиям на Коса. Изотопы тория в аэрозолях ясно демонстрируют

существование двух компонентов ресуспензии: местного и дистанционного происхождения.

18.3.5 Другие процессы

Помимо ресуспендирования, сжигание биомассы (например, лесные пожары) является еще одним потенциальным

источником некоторых антропогенных радионуклидов в воздухе и дождевой воде (например, в сильно

загрязненных районах вблизи места аварии на Чернобыльской АЭС), хотя радиоактивные аэрозоли, выделяемые

при сжигании биомассы зависит от химических свойств радионуклидов (¹³⁷

¹³⁷

Cs Pu)

(Луханиене, Анинявичюс и Луханас, 2009). Фактически, спорадические высокие концентрации

¹³⁷

Cs

в приземном воздухе наблюдались вблизи региона, сильно

загрязненного черномыльскими осадками (Грабовская *et al.*, 2003).

18.3.6 Применение мультитрейсеров

Использование радионуклидов с различными физическими и химическими свойствами в качестве мультитрейсеров

эффективно при решении сложных процессов, связанных с атмосферным аэрозолем. Как правило, в результате

аварий на ядерных реакторах в атмосферу выбрасывается много видов радионуклидов с различными физическими

и химическими свойствами. Состав радионуклидов, полученных в результате Чернобыльской аварии,

в пробах воздуха дает важную информацию об атмосферных процессах радиоактивного загрязнения.

аэрозоли, а также условия на реакторе на месте аварии. В

¹³⁴

Cs/¹³⁷

Коэффициент

активности Cs в приземном воздухе во время аварии на Чернобыльской АЭС, равный

0,5, был постоянным в течение периода с мая по июнь 1986 г., тогда как коэффициент активности Cs, наблюдаемый в Цукубе, Япония

увеличивался экспоненциально, и

¹⁰³

RU/¹³⁷

Коэффициент активности Cs в Чернобыле показал более высокие значения с

20 мая по 10 июня (рисунок 18.4). В таблице 18.3 показано относительное поверхностное кондиционирование воздуха.-

концентрации продуктов деления и плутония в ХС

¹³⁷

На различных станциях

мониторинга. Различия в поведении в атмосфере различных радионуклидов,

полученных в результате Чернобыльской аварии, объясняются различиями в

их химических свойствах (например, газо-частичный обмен на радиоактивный

йод) и способе выброса радиоактивного шлейфа (большие количества ¹⁰³

Ru были выброшены на вторичной стадии, чем при первоначальном взрыве в Чернобыле).

Таблица 18.3 показывает, что имело место постепенное снижение относительных концентраций

из тупоплавких продуктов деления (⁹⁵ Zr и

¹⁴¹

Ce; температуры кипения: 4400 и 2900 °C)

°

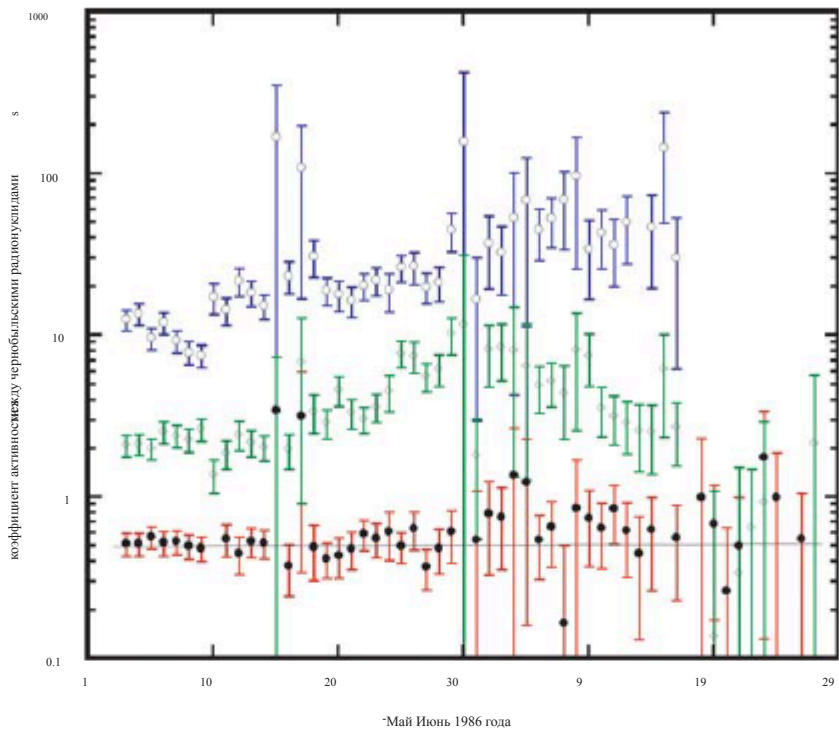


Рисунок 18.4 Временные вариации $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ ($^{103}\text{Ru}/^{137}\text{Cs}$ (разомкнутый круг), $^{103}\text{Ru}/^{137}\text{Cs}$ (открытая ромбическая форма), и ^{134}Cs (замкнутый круг) в пробах приземного воздуха, наблюдаемые в Цукубе, Японии. ^{137}Cs Цветовое исполнение смотрите в разделе "Табличка".

Относительные концентрации чернобыльских радионуклидов в приземном воздухе. Таблица

	18.3 Недалеко от Вартышевки, Балтика, Мюнхен, Харвелл, Нью-Йорк						Цукуба
	Чернобыль (140 км к юго-востоку) (1) регион (2) (3) (4) (5)						(6)
^{137}Cs	1	1	1 19	1 14	1	1	1
^{131}I	10	5	0.02	0.01	12	7	
^{90}Sr	- 3	-	0.2	0.02	-	-	0.001
^{94}Zr	6.8	1 -	0.4	1.3	- 1.7	0.01 0.3	-
^{103}Ru	2.5	3.2	1	0.7	0.6	0.2	2
^{140}Ba	3.7	-	0.1	0.02	0.01	0.02	-
^{141}Ce	-	-	2 ×	≤10	2 ×	≤10	- 2.8
$^{239,240}\text{Pu}$	-	-					× 10 ⁶

Ссылка: (1) Государственный комитет СССР (1986); (2) Медиана результатов для различных населенных пунктов из Крея. *et al.* (1986), Девелл *et al.* (1986), Камбре *et al.* (1987) и Ааркрог (1988); (3) Винкельман *et al.* (1987); (4) Камбрей *et al.* (1987); (5) Ларсен *et al.* (1986); (6) Хиросе (1995).

и плутония (3228 С) с увеличением расстояния от Чернобыля. Хотя рутений также является тугоплавким, его оксид, RuO_4 , является относительно летучим. Фактически, ^{103}Ru чернобыльское вещество содержалось в субмикронных частицах (0,35-0,65 мкм) (Аояма *et al.*, 1992). Ru , следовательно, был более стойким при транспортировке на большие расстояния. В $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ Коэффициент ^{137}Cs в пределах 80-километровой зоны составлял 0,3, и аналогичное соотношение было обнаружено Ааркрогом (1988) в образце почвы из Киева. Для удаленных объектов: $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ Соотношение ^{137}Cs в отложениях близ Мюнхена, Германия и

в Цукубе, Япония, составляло около 0,01 (Винкельман *et al.*, 1987; Хиросе, 1995). Эти результаты предполагают, что влияние чернобыльской радиоактивности на общее осаждение зависело от типа радионуклида. Для выяснения факторов, контролирующих различия в поведении различных радионуклидов в атмосфере, относительный вклад, F , радионуклиды, полученные в результате Чернобыльской аварии, к радионуклидам, полученным в результате Чернобыльской аварии

$F = (D_{Cs}/D_{Pu}) (Y_{Cs}/Y_{Pu})^{-1}$, где D_{Cs} и D_{Pu} представляют собой отложения, полученные в результате Чернобыльской аварии радионуклид и Y_{Cs} и Y_{Pu} представляют собой общее количество высвобожденных Cs, соответственно, и

Радионуклид чернобыльского происхождения и ^{137}Cs , соответственно. Относительный вклад, F , чернобыльский ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$ составил всего 1,5 и 0,18% соответственно - намного

меньше, чем вклад полученных в Чернобыле ^{137}Cs (Hirose, 1995). ОФП- конференции

в осаждении поведения между Чернобыльской полученных радионуклидов, главным образом к разнице в размерах между радионуклидов-подшипник частиц (размер заказа:

^{137}Cs и ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$; более крупные частицы легче удаляются из атмосферы путем влажного и сухого осаждения (Aoyama *et al.*, 1992; Хиросе *et al.*, 1993, 2001; Хиросе, 1995).

Примерно 60% от общего объема ^{95}Zr и $^{141,144}\text{Ce}$, выброшенный в результате аварии на Чернобыльской АЭС, осаждался в радиусе 80 км, тогда как 27% радиоактивного цезия и радиоактивного йода осаждалось в этой зоне.

В связи с аварией на АЭС "Фукусима" в 2011 году в воздухе были обнаружены преобладающие радионуклиды

были ^{133}I , ^{132}I , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs , ^{132}Te , и $^{129\text{m}}\text{Te}$ (Amano *et al.*, 2012; Doi *et al.*, 2013).

Значительное количество стойких радионуклидов не было обнаружено в пробах приземного воздуха

в Японии. Когда радиоактивный распад корректируется в конце инцидента на АЭС "Фукусима"

Дайити, соотношения между изотопами остаются почти постоянными в течение этого периода

Март -апрель 2011 г.: $^{133/131}\text{I}$, $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$, $^{136}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$, и $^{129\text{m}}\text{Te}/^{132}\text{Te}$ Значения Te составили

1,3, 1,1, 0,21 и 0,092 соответственно. С другой стороны, существовали большие различия между

элементами; исправлен распад $^{131/137}\text{I}$ Cs , с поправкой на распад $^{132}\text{Te}/^{137}\text{Cs}$ и с поправкой на распад

$^{99\text{m}}\text{Cs}$ находились в диапазоне от 8 до $1,0 \times 10^3$, от 4 до 65 и от 0,16 до 262, соответственно. Большой

$\text{Te}/^{137}\text{I}$ вариации $^{132/99\text{m}}\text{Cs}$

Cs предполагают, что на атмосферный выброс

радионуклидов, полученных на аэс "Фукусима", и удаление этих радионуклидов из атмосферы большое влияние оказали химические и физические свойства элементов. В Cs , $\text{Te}/^{137}\text{Cs}$ и $\text{Te}/^{137}\text{I}$ факт, значительное количество ^{131}I и ^{133}I существовал в газообразной форме, тогда как радиоцезий

прикрепляется к относительно более крупным частицам (1-5мкм).

18.3.7 Время пребывания радиоактивных аэрозолей в атмосфере

Классические модели отсека (Крей и Краевский, 1970) более эффективны, чем компьютерное

моделирование в обеспечении улучшенного концептуального понимания природных процессов

; соответствующие времена пребывания в атмосфере являются важными величинами для ограничения

временных масштабов аэрозолей, существующих в отсеке. Наземный отбор проб антропогенных

радионуклидов может дать важную информацию о движении радионуклидов в стратосфере.

аэрозоли. Мониторинг на большие расстояния ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, и ^{238}Pu

показывает, что их временные колебания отражают глобальное движение в

воздухе частиц, содержащих радионуклиды, в страто-сфере (Хиросе *et al.*, 1987). Долгосрочные измерения антропогенной радиоактивности в *et al.*

поверхностные аэрозоли и осаждение позволяют нам получать информацию о процессах переноса и

времени пребывания аэрозолей в верхних слоях тропосферы и стратосферы (Рейтер и Бауэр, 1975;

Кацураги, 1983; Хиросе *et al.*, 1987). Многолетние наблюдения атмосферных радионуклидов- поступающих

в организм животных в северном полушарии в средних широтах региона показывает, что ежегодное осаждение

радиоактивного мусора из термоядерных испытаний варьируется с явными стратосферного жительства

время в 0,5 - 1,7 года, что предполагает существование в стратосфере трех слоев с разными временными масштабами, то есть верхней стратосферы, нижней стратосферы (ниже 21 км) и слоя активного перемешивания и обмена (АМЕ) (чуть выше тропосферы). Половинные скорости переноса из верхнего слоя стратосферы в нижний стратосферный, из нижнего слоя стратосферы и пламени и из слоя ПЛАМЕНИ в тропосферу составляют 0,5, 0,7 и 0,3 года соответственно (Hirose *et al.*, 1987). Нижняя стратосфера с наибольшим временем полураспада (HRT) соответствует стратосферному сульфатному слою.

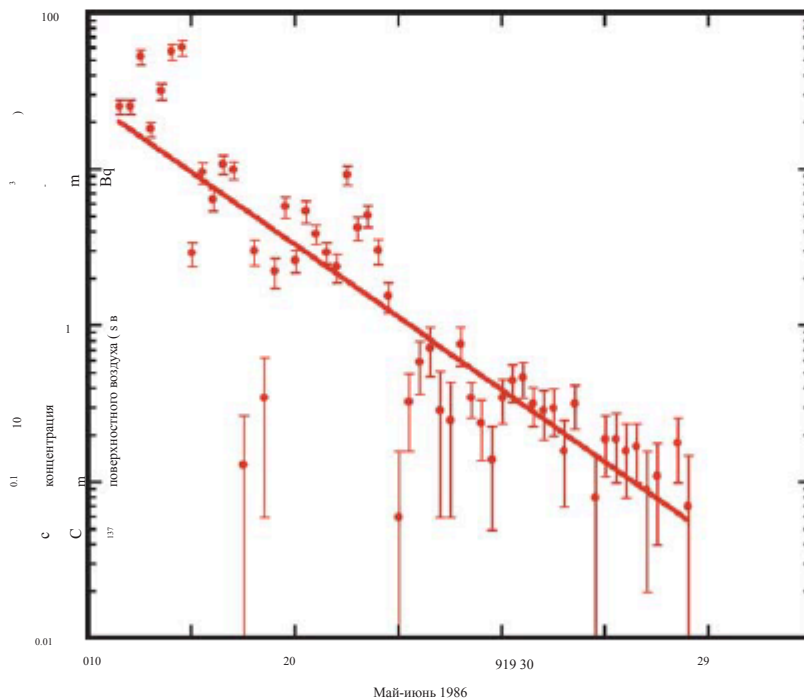
Чернобыль ¹³⁷CS в концентрации в приземном слое воздуха (рис. 18.5) в Японии снизился ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНО, которая, видимо, соответствует полувыведения составляет 6,5 дней. Среднее геометрическое еженедельных измерений ¹³⁷CS в Чилтоне, Гибралтаре, Тромсе и Гонконге раскрывает

что ¹³⁷CS в приземном воздухе снижается с периодом полураспада 6,3 дня (Камбрей *et al.*, 1987). С другой стороны, долгосрочные измерения чернобыльского осаднения обеспечивают кажущуюся ЗГТ, составляющую около 25 дней (Аояма, 1999). Долгосрочные измерения-

исследования вблизи Мюнхена показали, что продолжающееся снижение концентрации в приземном воздухе с периодом полураспада 230 дней (Хетцль, Рознер и Винклер, 1989). Эта более длинная половина-

¹³⁷CS объясняется ресуспензией локально отложившегося Cs. ¹³⁷CS из периода мониторинга на объекте. Хотя большая часть чернобыльской радиоактивности была введена в нижнюю тропосферу, небольшое количество чернобыльского ¹³⁷CS (около 0,5% от общего выброса) были перенесены в стратосферу (Яворовски и Ковначка, 1988; Аояма, Хироэ и Сугимура, 1991;

Аояма, 1999). Для аварии на Фукусиме максимальный ¹³⁷Отложение Cs произошло в марте 2011 года и экспоненциально уменьшилось с периодом полураспада около 12 дней в течение периода с марта по июнь 2011 года (рисунок 18.6) (Hirose, 2012). Долгосрочный мониторинг



Временное изменение чернобыльской аварии Рисунок 18.5 в Цукубе, Япония.

¹³⁷ Концентрация Cs в приземном воздухе

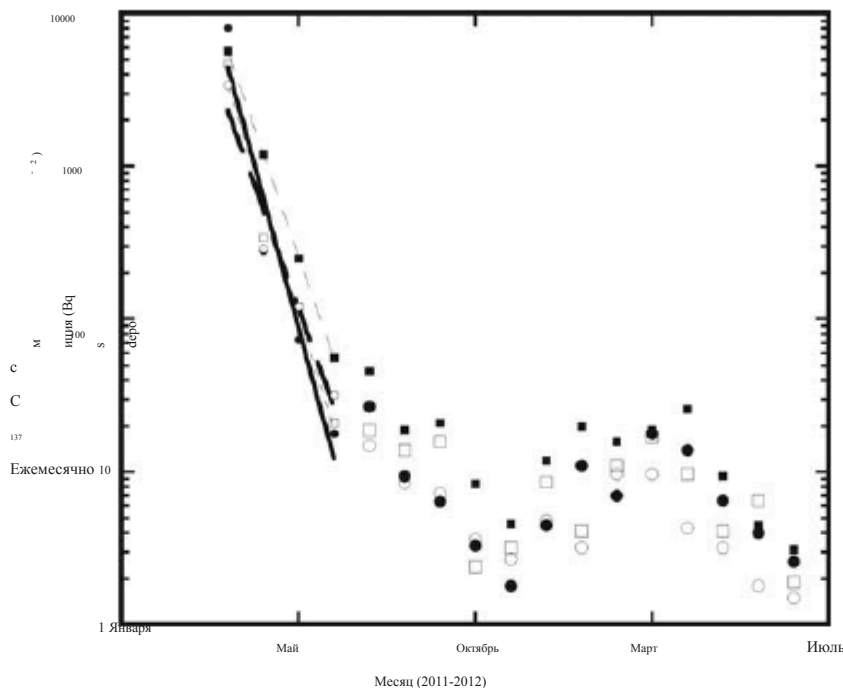


Рисунок 18.6 Временные различия в месячных выбросах фукусимского происхождения наблюдаются на станциях мониторинга на равнине Канто. Замкнутый круг: Токио; открытый круг: Чигасаки; замкнутая площадь: Уцунумия; открытая площадь: Такасаки.

¹³⁷Cs

ежемесячный ¹³⁷Отложение Cs показало, что период полураспада был более длительным (50 дней) в течение периода с июля по октябрь и что небольшой второй пик в ¹³⁷Осаждение Cs происходило зимой и весной 2012 г., что может быть связано с повторным суспензированием локально осажденных ¹³⁷КС (Хиросе, 2013).

Среди природных радионуклидов Be (подобно потомкам Rn) широко используется в качестве инструмента для изучения поведения аэрозолей в атмосфере. Be-7, образующийся в верхних слоях атмосферы, первоначально присоединяется к частицам Эйкена (0,015 мкм), которые увеличивают свой размер за счет коагуляции в тропосфере. Время пребывания тропосферных аэрозолей было оценено исходя из диаметра частиц в приземном воздухе и скорости роста частиц, которая оценивается в 0,004–0,005 мкм/с (Макмюррей и Уилсон, 1982). Расчетное время пребывания для

Время нахождения частиц, содержащих Be, составляет от 2,6 до 11,8 дней (Папастефану и Иоаниду, 1995; Винклер *et al.*, 1998; Ю и Ли, 2002). Значение времени пребывания, определенное на основе скорости роста и диаметра частиц, существенно отличается от значения для времени пребывания в тропосфере, полученного на основе средней концентрации радионуклидов в воздушном столбе тропосферы и соответствующего общего потока осаждения из воздушного столба (Ehhalt, 1973). В трехмерной модели химического индикатора время пребывания Be в тропосфере составляет 21 день (Koch, Jacob, and Graustein, 1996).

Атмосферный ²¹⁰Pb важен как входная функция на суше и на море, а также как индикатор атмосферных процессов образования аэрозолей (Баскаран, Коулман и Санчи, 1993).

Расчетное время пребывания в атмосфере для ²¹⁰Pb над западно-центральной частью США составляет 8 дней, Pb и его короткоживущие потомки (Мур, Поэт,

и Мартелл, 1973). Ламберт *et al.* (1982) оценили глобальное среднее время пребывания аэрозоля за 6,5 дней с использованием атмосферных данных по содержанию ^{222}Rn и ^{210}Pb , экстраполированных из наблюдения и вычисление ^{210}Po Поглощения Pb для уравнивания ^{222}Rn Распада Rn. Остаточный- ^{210}Pb был время падения тропосферных аэрозолей, рассчитанное на основе глобального 3D-моделирования, составляет 5-10 дней, в зависимости от сезона и широты (Balkanski *et al.*, 1993). Koch *et al.* (1996), используя трехмерную модель химического индикатора, аналогичную модели Balkanski *et al.* (1993), рассчитал время пребывания в ^{210}Po Частицы, содержащие Pb, на разных широтах от тропосфере 9 дней для 80°S до 80°N .

18.4 Индикатор изменений окружающей среды

Долгосрочные колебания антропогенных радионуклидов в аэрозолях и осаднении отражают изменения на поверхности Земли, включая миграцию радионуклидов по поверхности суши в результате эрозии, вызванной активизацией деятельности человека и возникающим в результате этого изменением климата. Временные колебания месячных отложений и соответствующая удельная активность антропогенных радионуклидов в отложениях (активность в остатке, в Бк г^{-1}) показаны в

Рисунок 18.3 (Хироэ *et al.*, 2003, 2008). $^{239,240}\text{Pu}$ Удельная активность Pu, которая была высокой в пыльный сезон (с января по май) и низкой в непыльный сезон (рисунок 18.3), показала $^{239,240}\text{Pu}$ Общее снижение Pu не наблюдалось в период 1990-2007 гг. По сравнению с другими годами, высокая удельная активность наблюдалась в пылевые сезоны (март или апрель) 2000, 2001, 2002, 2006 годов.,

и 2007 год. Изотоп плутония (^{240}Pu) Коэффициенты Pu (Hirose *et al.*, 2004) предполагают, что ^{240}Pu тоний в недавних образцах отложений произошел в результате испытаний ядерного оружия. В ^{137}Cs Удельная активность Cs, которая, как и активность плутония, была высокой в пылевой сезон и низкой в непыльный сезон (рис. 18.7a), постепенно снижалась в период 1990-2006 гг.

(Хироэ *et al.*, 2008). Очевидные преимущества ^{137}Cs Рассчитано, что удельная активность Cs в пыльный и непыльный сезоны составляла 30 ± 10 и 16 ± 4 года соответственно в течение ^{137}Cs . В период 1992-2006 годов с учетом последствий Чернобыльской катастрофы

кажущаяся ЗГТ периода полураспада ^{137}Cs Удельная активность Cs в пылевой сезон почти радиоактивного совпадает с ^{137}Cs в непыльный сезон, что указывает на миграцию ^{137}Cs на Восточноазиатском континенте, тогда как кажущаяся ЗГТ удельной активности ^{137}Cs в непыльный сезон соответствует таковой в поверхностных почвах Японии (14,4 года) (Игараси *et al.*, 2003), что означает, что ^{137}Cs в местных почвах постепенно мигрировал из - за поверхностных вод

^{90}Sr Специфические действия Sr, которые не показали разницы между пылью и непроточностью. Сезоны пыли (в отличие от сезонов Cs и плутония) постепенно сокращались (рисунок 18.7b). Сезон пыли ^{137}Cs очевидный ЗГТ ^{90}Sr Было рассчитано, что удельная активность Sr составит 12 ± 2 года в течение периода 1990-2005 годов, что совпадает с предыдущими оценками HRT по годовым отложениям (10 лет) и поверхностным слоям почвы (11 лет) (Игараси *et al.*, 2003). Это открытие говорит о том, что в

несмотря на экологические условия источников ^{90}Sr Таким образом, он постепенно мигрирует из поверхностного слоя почвы посредством таких процессов, как движение вниз с просачивающейся водой поток в толще почвы и переход от мелких частиц почвы к более крупным. А

изменение сигналов осаднения, таких как $^{239,240}\text{Pu}$ Активность, специфичная для Pu, и $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ Соотношения Sr, наблюдалось в 2000-х годах (Hirose *et al.* 2008; Игараси *et al.*, 2009); эти результаты свидетельствуют о том, что это изменение отражает недавнее опустынивание на Северо-Китайской равнине, северо-востоке Китая, и Корейском полуострове, возникшее в результате чрезмерных посевных площадей и изменения климата. Этот набор

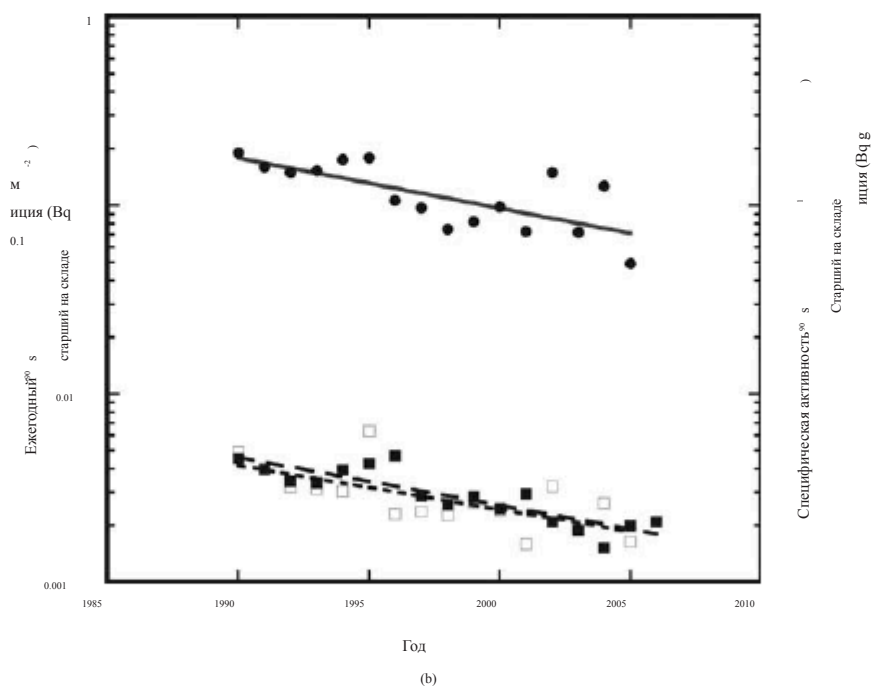
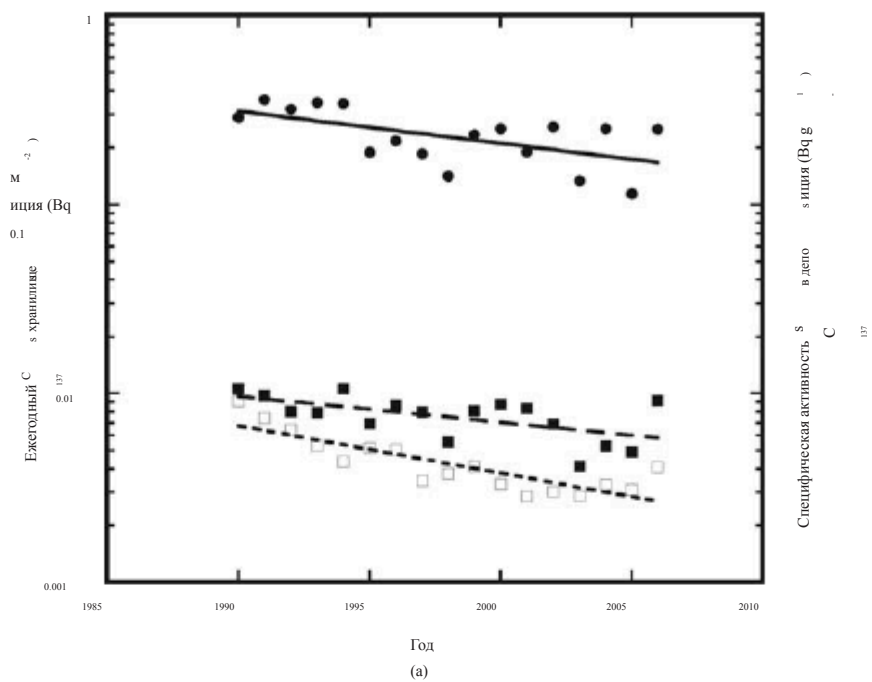


Рисунок 18.7 Долгосрочные тенденции в ежегодных (а) Cs и (б) конкретных мероприятиях, наблюдаемых в Цукубе, Япония. Замкнутый круг: среднегодовая удельная активность, замкнутый квадрат: ежегодное осаждение (пылевой сезон, январь-май), открытый квадрат (непыльный сезон, июнь - декабрь).

осаждение антропогенных радионуклидов является полезным инструментом мониторинга текущих экологических изменений в земной среде.

Природные радионуклиды в аэрозолях демонстрируют долгосрочную изменчивость из-за изменений источников и поглотителей, что сопровождается активизацией деятельности человека и, как следствие, изменением климата

измениться. Как правило, содержание в аэрозолях и осаждение имеют примерно 11-летний цикл, совпадающий- в связи с солнечной активностью. Хотя аэрозольный торий имеет земное происхождение,,²³² Осаждение Th

проявляет долговременную изменчивость (Хироэ *et al.*, 2012). Ежегодное осаждение²³² Th показало

тенденцию к увеличению в период 1990-2007 годов, как показано на рисунке 18.8. В отличие от

по сравнению с месячным осаждением²³² Th, годовое временное изменение годового осаждения²³² Th

не соответствовало годовой частоте событий Kosa, наблюдаемых в

Японии. На рисунке 18.8 показано, что дистанционно выведенный годовое²³² Осаждение Th демонстрирует

тенденцию к увеличению со скоростью увеличения 2% в год в период 1990-2007 гг.,

хотя корреляция с тенденцией к увеличению слабая ($r = 0,45$). С другой стороны,

рассчитанный на местном уровне годовое²³² Отоложение Th не показывает тенденции ($r = 0,37$). Этот результат

показывает, что большая часть прироста годовых²³² Отоложение Th связано с удаленным

Тыс.Т. Данные временных рядов о среднегодовой удельной²³² Th (рисунок 18.7)

активности производных варьируются от 3,1 до 11,2 Бк г⁻¹, в среднем 7,4 Бк г⁻¹, показывающий тенденцию к увеличению

со скоростью увеличения 3,4% в год ($r = 0,68$) с 1990 по 2007 год. Это трудно сделать

объясните тенденцию увеличения среднегодовой удельной активности

пылью, поскольку нагрузка минеральной пылью, по-видимому, не имеет долгосрочной тенденции.

Это означает, что вклад пыли, обогащенной²³² Th, увеличился в течение периода

1990 -2007. Следовательно, рассматривается возможная причина увеличения отложения²³² -Го

быть приращением²³² Пыль, обогащенная Th, а не минеральной пылью.

Сжигание угля является потенциально важным источником атмосферного тория в Восточной

Азии, поскольку потребление угля в Японии и Китае увеличилось с $0,026 \times 10^{15}$ до $0,084 \times 10^{15}$ г С и

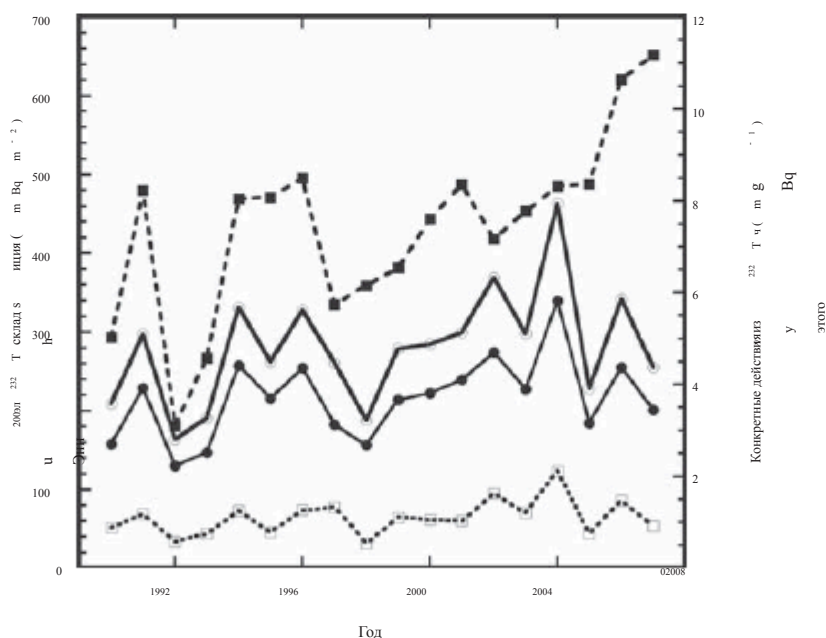


Рисунок 18.8 Долгосрочные тенденции в годовом исчислении Чукуба, Япония. Замкнутый квадрат: среднегодовая удельная активность, незамкнутый круг: ежегодное осаждение, замкнутый круг: осаждение, полученное дистанционно, открытый квадрат: осаждение, полученное локально.

g C, соответственно, в период с 1990 по 2005 год в результате от $0,9 \times 10^{15}$ до $2,2 \times 10^{15}$ о растущей активности угольных электростанций в этом регионе. Хотя основная часть золы-уноса, образующейся при сжигании угля, остается в электрофильтрах (Papastefanou, 2010), 1-3% золы-уноса уносится в атмосферу в виде мелких частиц. Примерно $0,8 \times 10^{12}$ и $0,02 \times 10^{12}$ По оценкам, Бк тория были выброшены в атмосферу в результате сжигания угля Китаем в 2007 году ($2,6 \times 10^{15}$ г C) и Японией в 2005 году, соответственно, при условии содержания тория в 0,03 Бк г⁻¹ в угле (Tadmor, 1986; Lu, Jia и Wang, 2006) и что 1% тория, содержащегося в угле, выбрасывается в атмосферу при сжигании угля.

По сравнению с почвой зола-унос обогащена по отношению к Th (Tadmor, 1986; Lu *et al.*²³², 2006; Папастефану, 2010). Это наводит на мысль о гипотезе, что растущее сжигание угля на тепловых электростанциях влияет на долгосрочную тенденцию осаждения тория на Цукубе.

Межгодовые изменения в ²¹⁰ Было признано осаждение Pb (Бекс, Эйсма и ван дер Плихт, 1998; Баскаран, 2011). Поскольку Восточная Азия находится ниже по течению азиатского стока, включая поступление антропогенных загрязняющих веществ и азиатской пыли, исследования поведения осаждения ²¹⁰ Pb в Восточной Азии может быть полезен для отслеживания изменений оттока в Азию. Су и Хух (2003) наблюдали осаждение Pb в 1998 году, которое соответствовало Эль-Ниньо событие. Долгосрочная изменчивость в осаждении ²¹⁰ Pb в Восточной Азии тесно связана с осаждением в количество осадков, особенно зимой, которое отражает изменение климата. Концентрация в ²¹⁰ Pb в дождевой воде также демонстрирует долгосрочную изменчивость (Hirose *et al.*, 2011). Однако, неясно, почему усиленный ²¹⁰ Pb в дождевой воде в Восточной Азии должна составлять Осаждение в результате явления Эль-Ниньо. Чтобы объяснить межгодовые изменения в ²¹⁰ Pb, Бекс . (1998) исследовали возможность существования дополнительных источников атмосферного *et al* ²¹⁰ Pb или ²²² Rn помимо ²²² выдоха Rn с поверхности суши. Извержение вулкана и промышленные выбросы были упомянуты в качестве кандидатов на роль дополнительных источников атмосферный ²¹⁰ Pb. Однако, оценка глобального вклада вулканических источников предположил, что вулканические выбросы ²¹⁰ Pb (и местные промышленные выбросы) воспроизводятся только играют незначительную роль по Выдыхание Rn (Beks *et al.*²²², 1998). С другой стороны, ²¹⁰ сравнению с промышленными выбросами, ²¹⁰ выбросы Pb в результате сжигания в Китае оцениваются в 0,2-0,6 ПБк в год⁻¹, соответствуют примерно 0,4 - 1,2% от ²¹⁰ Pb, образующийся в результате глобального ²²² выброса Rn (Hirose). *et al.*, 2011). Хотя эта оценка предполагает незначительный вклад в глобальный ²²² К сожалению, продолжающийся рост выбросов загрязняющих веществ в Китае серьезно повлияет на радиоактивность окружающей среды в Восточной Азии. Сжигание биомассы, которое усиливается во время Эль-Ниньо и достигло максимума во время Эль-Ниньо 1998 года (ван дер Верф *et al.*, 2006), влияет на химию глобальной атмосферы (Crutzen and Andreae, 1990) и является еще одним кандидатом на добавление-национальный источник атмосферного ²¹⁰ Pb. В ²¹⁰ Рассчитан выброс Pb при сжигании биомассы (Hirose составит примерно 1,6 ПБк в год⁻¹ *et al.*, 2011), что соответствует примерно 3% от Rn ²¹⁰ Pb, происходящий из глобального ²²² выдоха. Как и в случае с другими причинами, изменение показателя ²¹⁰ Концентрация Pb в дождевой воде может быть обусловлена межгодовыми изменениями континентального климата. районах в зимний период, которые могут ²¹⁰ Источники Pb и / или в ²¹⁰ Перенос Pb из районов происхождения, действовать как оба в результате изменения климата.

18.5 Заключение

Природные и антропогенные радионуклиды могут эффективно использоваться в качестве атмосферных индикаторов. Временное и пространственное распределение радиоактивных аэрозолей и их осаждение обеспечивают

знания о поведении аэрозолей в атмосфере и существующих экологических изменениях, возникающих в результате растущей деятельности человека.

В марте 2011 года авария на АЭС "Фукусима" после сильного землетрясения и последовавшего за ним цунами в Восточной Азии привела к выбросу большого количества радиоактивных аэрозолей и газов в окружающую среду, что вызвало серьезную озабоченность общественности по поводу радиологического риска. Однако авария на АЭС "Фукусима" также предоставила редкую возможность получить новую информацию о поведении радиоактивных аэрозолей в атмосфере, такую как проверка моделей рассеивания и осаждения аэрозолей. Таким образом, изучение радиоактивных аэрозолей, включая разработку измерений, является актуальной темой, хотя исследования радиоактивных аэрозолей имеют историю, насчитывающую более 60 лет.

Список литературы

- Ааркрог, А. (1988) Радиологическое воздействие обломков Чернобыльской АЭС по сравнению с таковым в результате радиоактивных осадков от ядерного оружия. *Журнал радиоактивности окружающей среды*, 6, 151-162.
- Аmano X., Акьяма М., Чунлей Б. *et al.* (2012) Измерения радиации в Тибете
- Столичный регион и радиологические аспекты радиоактивных осадков в результате аварии на АЭС "Фукусима-Дайити". *Журнал радиоактивности окружающей среды*, 111, 42-52.
- Анспо, Л.Р., Кэтлин, Р.Дж. и Голдман, М. (1988) Глобальное воздействие Чернобыльской аварии аварии на реакторе. *Наука*, 242, 1513- 1519.
- Аояма, М. (1999) Геохимические исследования поведения антропогенных радионуклидов в атмосфере докторская диссертация, Университет Канадзавы.
- Аояма М., Хиросе К. и Сугимура Ю. (1991) Временное изменение стратосферных осадков в результате аварии на Чернобыльской АЭС. *Журнал радиоактивности окружающей среды*, 13, 103 - 115.
- Аояма М., Хиросе К., Судзуки Ю. *et al.* (1986) Радиоактивные нуклиды высокого уровня в Японии в мае. *Природа*, 321, 819 - 820.
- Аояма М., Хиросе К. и Такатани С. (1992) Сухое осаждение в зависимости от размера частиц скорость чернобыльской радиоактивности, в *Поглощение осадков и атмосферные обменные процессы; Пятая международная конференция*, Том II. 3 (ред. С. Э. Шварц и В.Г.Н. Слинн), Полушарие, Вашингтон, округ Колумбия, стр. 1581 -1593.
- Аримото Р., Узбб Дж.Л. и Конли М. (2005) Радиоактивное загрязнение атмосферы пыль над юго-востоком Нью-Мексико. *Атмосферная среда*, 39, 4745-4754.
- Балкански, Ю.Дж., Джейкоб, Д.Дж., Гарднер, Г.М. *et al.* (1993) Время транспортировки и проживания о тропосферных аэрозолях, полученных на основе глобального трехмерного моделирования *Журнал геофизических исследований*, 98, 20573-20586.
- Барри, Л.А. (1985) Коэффициенты поглощения, влажное осаждение и окисление в облаке: применение к оксидам серы и азота. *Журнал геофизических исследований*, 90, 5789 -5799.
- Баскаран, М. (2011) Po-210 и Pb-210 как атмосферные индикаторы и глобальные атмосферные осадки Осадки Pb-210: обзор. *Журнал радиоактивности окружающей среды*, 102, 500- 513.
- Баскаран, М., Коулман, К.Х. и Санчи, П.Х. (1993) Потоки атмосферных осадков ⁷ ²¹⁰ Pb в Галвестоне и Колледж-Стейшн, Техас. *Геофизический журнал из Ве и Исследования*, 98, 20555 - 20571.
- Бекс, Дж.П., Эйсма, Д. и Ван дер Плихт, Дж. (1998) Рекорд атмосферного осаждения ²¹⁰ Pb в Нидерландах. *Наука об окружающей среде в целом*, 222, 35 - 44.

- Бондиетти, Э.А. и Брэнтли, Дж.Н. (1986) Характеристики чернобыльской радиоактивности в Tennessee. *Природа*, **322**, 313-314.
- Брандт Дж., Кристенсен Дж.Х. и Фрон Л.М. (2002) Моделирование переноса и осаждения цезия и йода в результате аварии на Чернобыльской АЭС с использованием модели DREAM. *Химия и физика атмосферы*, **2**, 397-417.
- Камбрэй, Р.С., Коуз, П.А., Гарланд, Дж.А. *et al* (1987) Наблюдения за радиоактивностью с Чернобыльская авария. *Ядерная энергетика*, **26**, 77 -101.
- Чемберлен, А.К. (1953) Эксперименты по осаждению паров йода-131 на поверхность-лица из воздушного потока. *Философский журнал*, **44**, 1145 -1153.
- Чемберлен, А.С. (1991) *Радиоактивные аэрозоли*, Кембриджская химия окружающей среды Серия, том. 3, Издательство Кембриджского университета.
- Чино М., Накаяма Х., Нагаи Х. *et al*. (2011) Предварительная оценка выпущенных суммы ^{131}I и ^{137}Cs случайно выбросился с атомной электростанции "Фукусима Дайити" в атмосферу. *Журнал ядерной науки и технологий*, **48**, 1129- 1134.
- Крецелиус, Э.А., Робертсон, Д.Э.Н., Абель, К.Х. *et al*. (1978) Атмосферное осаждение Be и других элементов на побережье Вашингтона, в *Ежегодный отчет Тихоокеанской Северо-Западной лаборатории за 1977 год помощнику секретаря Министерства энергетики США по окружающей среде: экологические науки, PNL-2500 PT-2*, Тихоокеанская Северо-западная лаборатория, Баттелле, стр. 7.25 - 7.26.
- Крутцен, П.Дж. и Андреас, М.О. (1990) Сжигание биомассы в тропиках: влияние на атмосферу-сферическая химия и биогеохимические циклы. *Наука*, **250**, 1669 - 1678.
- Девелл Л., Товедал Х., Бергстрем В. *et al* (1986) Первоначальные наблюдения за выпадением радиоактивных осадков из авария на реакторе в Чернобыле. *Природа*, **321**, 192 - 193.
- Дон Т., Масумото К., Тойода А. *et al*. (2013) Антропогенные радионуклиды в атмосфера, наблюдаемая на Цукубе: характеристики радионуклидов, полученных на Фукусиме. *Журнал радиоактивности окружающей среды*, **122**, 55- 62.
- Эххальт, Д.Х. (1973) Времена оборота ^{137}Cs и НТО в тропосфере и скорости удаления о природных частицах и водяном паре. *Журнал геофизических исследований*, **78**, 7076-7086.
- Энглманн Р.Дж. (1971) Прогнозирование загрязнения с использованием соотношений концентраций в воздухе и осадках. *Журнал прикладной метеорологии*, **10**, 493 -497.
- Фудзивара Х., Фукуяма Т., Ширато Ю. *et al*. (2007) Осаждение атмосферных ^{137}CS в Япония связана с азиатским пылевым событием в марте 2002 года. *Наука об окружающей среде в целом*, **384**, 306-315.
- Гирлянды, Ю. А. и Камбре, Р. С. осаднения (1988), подъема и долгосрочных вариаций воздушно-десантной радиации из Чернобыля. Материалы 6-го Международного симпозиума по радиоэкологии Кадараша, Центр ядерной науки Кадараша, Франция, том 1, стр. В26- В31.
- Грабовская С., Метельски Дж.В., Козак К. и Гака П. (2003) Гамма-излучатели на микроэлектронике.- Уровень активности Беккереля в воздухе в Кракове (Польша). *Журнал химии атмосферы*, **46**, 103- 116.
- Харви, М.Дж. и Мэтьюз, К.М. (1989) - отложение в районе с большим количеством осадков в Нью-Йорке. Зеландия. *Журнал химии атмосферы*, **8**, 299 -306.
- Hass, H., Memmesheimer, M., Geis, H. *et al*. (1990) Моделирование Чернобыльской катастрофы радиоактивное облако над Европой с использованием модели EURAD. *Атмосферная среда*, **24A**, 673 - 692.

- Hernández-Ceballos, M.A., Hong, G.H., Lozano, R.L. *et al.* (2012) Отслеживание полного изменение поверхностных западных направлений над Северным полушарием с использованием радионуклидов, выброшенных из Фукусимы. *Наука об общей окружающей среде*, **438**, 80-85. Хиросе К. (1995) Геохимические исследования радиоактивности Чернобыльской АЭС в окружающей среде образцы. *Журнал радиоаналитической и ядерной химии - Статьи*, **197**, 331-342. Хиросе К. (2000) Поведение изотопов тория при сухом и влажном осаждении. *Журнал аэрозольных исследований Research, Япония*, **15**, 256-263.
- Хиросе, К. (2012) Авария на атомной электростанции "Фукусима-Дайити" в 2011 году: краткое изложение результатов мониторинга регионального осаждения радиоактивности. *Журнал радиоактивности окружающей среды*, **111**, 13 - 17.
- Хиросе К. (2013) Временные колебания месячных значений ¹³⁷ Наблюдаемые в Японии отложения Cs: последствия аварии на атомной электростанции "Фукусима-Дайити", *Применяемое излучение и изотопы*, **66**, 1675-1678.
- Хиросе К., Аояма М., Кацураги Ю. и Сугимура Ю. (1987) Ежегодное отложение Sr-90, Cs-137 и Pu-239 240 от ядерных взрывов 1961-1980 годов: простая модель. *Журнал Метеорологического общества Японии*, **65**, 259-277. Хиросе К., Игараси Ю. и Аояма М. (2007) Последние тенденции выпадения плутония наблюдалось в Японии: сравнение с природными литогенными радионуклидами, изотопами тория. *Журнал радиоаналитической и ядерной химии*, **273**, 115-118. Хиросе К., Игараси Ю. и Аояма М. (2008) Анализ 50-летних записей атмосферных осадков осаждение долгоживущих радионуклидов в Японии. *Применяемое излучение и изотопы*, **66**, 1675 -1678.
- Хиросе К., Игараси Ю., Аояма М. и Иномата Ю. (2010) Поведение отложений плутоний и торий в Цукубе и на горе Харуна в Японии указывают на источники атмосферной пыли. *Журнал радиоактивности окружающей среды*, **101**, 106 - 112.
- Хиросе К., Игараси Ю., Аояма М. *et al* (2003) Последние тенденции выпадения плутония наблюдалось в Японии: плутоний как фактор опустынивания. *Журнал экологического мониторинга*, **1**, 1-7. Хиросе К., Игараси Ю., Аояма М. и Мияо Т. (2001) Долгосрочные тенденции Плутония- выпадение ниума, наблюдаемое в *Плутоний в окружающей среде* (ред. А. Кудо), Elsevier Япония, в Science, стр. 251-266.
- Хиросе К., Кикавада Ю., Дои Т. *et al.* (2011) ²¹⁰ Осаждение Pb на Дальнем Востоке Азии: определяющие факторы его пространственных и временных вариаций. *Журнал радиоактивности окружающей среды- tivity*, **102**, 514-519.
- Хиросе К., Кикавада Ю. и Игараси Ю. (2012) Временные вариации и происхождение thо-отложение рия, наблюдаемое в Цукубе, Япония. *Журнал радиоактивности окружающей среды*, **108**, 24-28.
- Хиросе К., Ким К.К., Kim, C.S. *et al.* (2004) Отложение плутония, наблюдаемое в Тэджоне. Корея: влажные и сухие отложения плутония. *Наука об окружающей среде в целом*, **332**, 243- 252. Хиросе К. и Сугимура Ю. (1990) Изотопы плутония в приземном воздухе Японии: эффект аварии на Чернобыльской АЭС. *Журнал радиоаналитической и ядерной химии - Статьи*, **138**, 127-138. Хиросе К., Такатани С. и Аояма М. (1993) Мокрое осаждение долгоживущих радионуклидов образовавшихся в результате аварии на Чернобыльской АЭС. *Журнал химии атмосферы*, **17**, 61-73.

- Хетцль Х., Рознер Г. и Винклер Р. (1989) Долгосрочное поведение чернобыльских осадков в воздух и осадки. *Журнал радиоактивности окружающей среды*, **10**, 157-171.
- Huh, C.A., Hsu, S.-C. и Lin, C.-Y. (2012) Мониторинг радионуклидов, полученных при делении на Фукусиме по всему Тайваню: свободный перенос в тропосфере в сравнении с переносом в пограничном слое. *Письмо о планетологии Земли*, **319-320**, 9-14. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) (2006) *Экспериментальные последствия аварии в Шер-Нобиле-их посредничество: двадцатилетний опыт. Отчет экспертной группы форума "Окружающая среда" Шер-нобил*, Серия отчетов о радиологической оценке, МАГАТЭ, Вена. Игараши Ю., Аояма М., Хиросе К. *et al.* (2003) Ресусценция: десятилетний период мониторинга серия антропогенных отложений радиоактивности в Японии. *Журнал радиационных исследований*, **44**, 319-328.
- Игараси, Ю., Аояма, М., Хиросе, К. (2001) Возможно ли использовать др. ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs как индикаторы эолийского переноса? *Загрязнение воды, воздуха и почвы*, **130**, 349-354.
- Игараши, Ю., Иномата, Ю., Аояма, М. *et al.* (2009) Возможное изменение источника пыли в Азии предполагается по атмосферным антропогенным радионуклидам в 2000-х годах. *Атмосферная окружающая среда*, **43**, 2971-2980.
- Иман К., Чино М., Исигава Х. *et al.* (1985) *SPEEDI*: Компьютерная кодовая система для Прогнозирование дозы облучения населения в режиме реального времени в результате случайного выброса, JAERI 1297, Японский институт атомных исследований. Яворовски З. и Ковнацка Л. (1988) Распределение радиоактивного йода и цезия в тропосфере и стратосфере после аварии на Чернобыльской АЭС. *Журнал охраны окружающей среды Радиоактивность*, **6**, 145-150. Йост Д.Т., Гаггелер Х.В., Балтенспаргер В. *et al.* (1986) Чернобыльские осадки в фракционированный по размеру аэрозоль. *Природа*, **324**, 22-23.
- Junge, C.E. (1963) *Химия воздуха и радиоактивность*, Academic Press, Нью-Йорк. Юнге, К.Э. и Мэнсон, Дж.Э. (1961) Исследования стратосферного аэрозоля. *Геофизический журнал*, **66**, 2163 - 2182. *Исследования*
- Карлссон, Л., Эрнандес, Ф., Родригес, С. (2008) Использует ¹³⁷Cs и ^{K40} определить естественный вклад сахарской пыли в образование ТЧ₁₀ концентрации и ухудшение качества воздуха на Канарских островах. *Атмосферная среда*, **42**, 7034 -7042.
- Кацураги, Ю. (1983) Исследование ⁹⁰ Радиоактивных осадков Sr в Японии. *Документы в области гидрометеорологии и геофизика*, **33**, 277 -291.
- Кох, Д.М., Джейкоб, Д.Дж. и Граустейн, В.К. (1996) Вертикальный перенос тропосферных аэрозоли, указанные в Ве и ⁷ ²¹⁰ Pb в модели химического индикатора. *Журнал Геофизические исследования*, **101**, 18651-18666.
- Колб, В. (1989) сезонные колебания урановой и ториевой содержание аэрозолей в приземного воздуха. *Журнал радиоактивности окружающей среды*, **9**, 61-75.
- Крей, П.В., Клусек, К.С., Сандерсон, К. *et al.* (1986) Радиохимическая характеристика Чернобыльские осадки в Европе, в отчете EML 460, в (ред. Х.Л. Волчок), Министерство энергетики США, стр. 155-218. Крей П.В. и Краевский Б.Т. (1970) Сравнение модели атмосферного переноса cal- исследования с наблюдениями *Журнал геофизических исследований*, **75**, радиоактивного мусора. 2901- 2908.

- Крей, П.В., Лейфер, Р., Бенсон, У.К. *et al.* (1979) Выгорание в атмосфере "Космоса-954" реактор. *Наука*, **205**, 583- 585.
- Курода П.К., Мияке Ю. И Немото Дж. (1965) Изотопы стронция: глобальная циркуляция после Китайский ядерный взрыв 14 мая 1965 года. *Наука*, **150**, 1289- 1290.
- Ламберт Г., Полиан Г., Санак Дж. *et al.* (1982) Cycle du radon et de ses descendants: application a l'étude des échanges troposphère-stratosphère. *Annales de Geophysique*, **38**, 497-531.
- Ларсен Р.Дж., Сандерсон К., Ривера У. и Замичиелли М. (1986) Характеристика о радионуклидах в приземном воздухе Северной Америки и Гавайев и их осаждении после аварии на Чернобыльской АЭС, в отчете EML 460, в (ред. Х.Л. Волчок), Министерство энергетики США, стр. 1-140. Ли С.Х., Фам М.К. и Повинек П.П. (2002) Колебания содержания радионуклидов в воздухе над Монако. *Журнал радиоаналитической и ядерной химии*, **254**, 445 - 453.
- Лу, Х., Цзя, Х. ван, Ф. (2006) естественной радиоактивности угля и продуктов его переработки в Баоцзи угольной ТЭЦ, Китай. *Текущий Наук*, **91**, 1508-1511.
- Луханиене Г., Анинкявичюс В. и Луханас В. (2009) Искусственные радионуклиды в атмосфере-сфера над Литвой. *Журнал радиоактивности окружающей среды*, **100**, 108- 119.
- Луханиене, Г., Биценкене, С., Повинец, П.П. и Гера, М. (2012) Радионуклиды последствия аварии на АЭС "Фукусима" в воздухе над Литвой: измерение и моделирование подходы. *Журнал радиоактивности окружающей среды*. doi: 10.1016/j.дженврад.2011. 12.004 Махта Л., Лист Р.Дж. и Хубер Л.Ф. (1956) Всемирное путешествие атомных обломков. *Наука*, **124**, 474.
- Мартелл, Э.А. (1966) Распределение по размерам и взаимодействие радиоактивных и природных аэрозолей в стратосфере. *Tellus*, **18**, 486-498.
- Мартин П. (2003) Радионуклиды ряда урана и тория в дождевой воде на протяжении нескольких лет.- ледяные штормы. *Журнал радиоактивности окружающей среды*, **65**, 1 - 18.
- Массон О., пига, Д. Гурриаран, р. и Д'Амико, Д. (2010) Влияние исключительное Вспышка пыли из Сахары во Франции: ПМ₁₀ концентрации искусственных радионуклидов в воздухе и в пылевых отложениях. *Атмосферная среда*, **44**, 2478 - 2486.
- Масунами Т. и Мамуро Т. (1975) Исследование отложения урана бассейновым методом. *Ежегодный отчет Радиационного центра префектуры Осака*, **16**, 22-24.
- Макмарри, П.Х. и Уилсон, Дж.К. (1982) Законы роста для образования вторичной окружающей среды-аэрозоли: последствия для механизмов химической конверсии. *Атмосферная среда*, **16**, 121-134.
- Макнери, Д. и Баскаран, М. (2003) Характеристики отложений Be и ⁷ ²¹⁰Pb на юго-востоке Мичигана. *Журнал геофизических исследований*, **108**(D7), 4201. doi: 10.1029/2002JD003021
- Мур, его превосходительство, Поэт, С.Е. и Мартелл, Э.А. (1973) ²²²Rn, ²¹⁰Pb, ²¹⁰Bi, и ²¹⁰Pb Профили ПО и время пребывания аэрозоля в зависимости от высоты. *Журнал геофизических исследований*, **78**, 7065 -7075.
- Morigo, Y., Охара Т. и Нисидзава М. (2011) Поведение атмосферы, осаждение и запас радиоактивных материалов на атомной электростанции Фукусима-Дайити в Японии. *Журнал геофизических исследованиях*, **38**, L00G11.

- Национальный совет по радиационной защите и измерениям (NCRP) (1987) Воздействие население Соединенных Штатов и Канады в результате естественного фонового излучения, Отчет № 94, NCRP. Николсон К.У.
- (1988) Обзор ресуспендирувания частиц. *Атмосферная среда*, **22**, 2639- 2651.
- Папастефану, С. (2008) Радиоактивные аэрозоли в *Радиоактивность в окружающей среде Серии*, Вып. 12 (ред. М.С. Бакстер), Elsevier.
- Папастефану, С. (2010) Утечка радиоактивности с угольных электростанций (ТЭС) из-за угля горение и связанные с ним опасности: обзор. *Журнал радиоактивности окружающей среды*, **101**, 191 - 200.
- Папастефану, С. и Иоанниду, А. (1995) Связь аэродинамических размеров Be в окружающей среде аэрозоли. *Журнал радиоактивности окружающей среды*, **26**, 273- 282.
- Папастефану, К., Иоанниду, А., Студос, С. и Манолопулу, М. (1995) Атмосферный отложение космогенных отложений и ^{137}Cs из-за последствий аварии на Чернобыльской АЭС. *Наука от общей окружающей среды*, **170**, 151 -156.
- Peirson, D. X., В sawse, A. П., лосось, Л. и Камбре, Р. С. (1973) микроэлементы в атмосферной среды. *Природа*, **241**, 252- 256.
- Перссон, К., Роде, Х. и де Гир, Л.Э. (1987) Авария на Чернобыльской АЭС - метеорологический анализ- анализ того, как радионуклиды достигли Швеции и отложились в ней. *Ambio*, **16**, 20- 31. Порстендорфер
- Дж. и Грюндель М. (2003) Сравнение распределения активности по размерам аэрозоли радионуклидов в наружном воздухе, в *Сборник тезисов, Дрезденский симпозиум по радиационной защите, Дрезден, Германия*, Dresden University of Technology, Dresden, p. 24. Reiter, E.R. and Bauer, E. (1975) *Время пребывания загрязняющего вещества в атмосфере*, CIAP Моно- график, Том. 1, Министерство транспорта США, Вашингтон, округ Колумбия.
- Рознер Г., Хотцл Х. и Винклер Р. (1997) Долгосрочное поведение плутония в воздухе и отложение и роль ресуспендирувания в полусельских условиях Германии. *Наука об окружающей среде в целом*, **196**, 255-261. Рознер Г. и Винклер
- Р. (2001) Долгосрочные изменения (1986-1998) постчернобыльской ситуации ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu и $^{239,240}Pu$ Концентрации Pu в воздухе, осаждения на землю, факторы ресуспендирувания и скорости ресуспендирувания в южной Германии. *Наука об окружающей среде в целом*, **273**, 11-25.
- Сакураги Ю., Меасон Дж.Л. и Курода П.К. (1983) Изотопы урана и плутония в атмосфера. *Журнал геофизических исследований*, **88**, 3718 - 3724.
- Санак Дж., Годри А. и Ламберт Г. (1981) Распределение по размерам Pb по океаны. *Письма о геофизических исследованиях*, **8**, 1067- 1069.
- Сехмель Г.А. (1980) Сухое осаждение частиц и газов: обзор. *Атмосферная среда*, **14**, 983- 1011.
- Шинн, Дж.Х., Хоман, Д.Н. и Грей, Д.Д. (1983) Потоки аэрозоля плутония и легкие уровни воздействия при повторном взвешивании из голых почв вблизи установки химического разделения, в *Очистка от осадков, сухое осаждение и повторное взвешивание* (ред. Х.Р. Прупахер, Р.Г. Семонин и В.Г.Н. Слинн), Elsevier, Амстердам, стр. 1131-1143. Слинн, В.Г.Н. (1978) Параметризации для ресуспендирувания и для влажного и сухого осаждения частицы и газы для использования при расчетах доз облучения. *Ядерная безопасность*, **19**, 205 - 219.

- Смолл, С.Х. (1960) Влажное и сухое нанесение радиоактивных осадков в Кьеллере. *Tellus*, **12**, 308- 314.
- Стюарт К. (1966) подъема частиц материала с поверхности, в *Поверхность Кон- выявлена* (под ред. Р. Б. Рыб), Пергамский, Оксфорд, с. 63 - 74.
- Стол, А., Зайберг, Р., Вотава, Г. *et al.* (2011) Выбросы ксенона-133 и кезезия-137 в атмосфера атомной электростанции "Фукусима Дайчи": определение термина источника, рассеивания в атмосфере и осаднения. *Обсуждения химии и физики атмосферы.*, **11**, 28319 - 28394.
- Su, С.-С. и Huh, С.-А. (2003) Факторы, контролирующие атмосферные потоки Ве и на севере Тайваня. *Письма о геофизических исследованиях.*, **30**, 2018.
- Тадмор, Дж. (1986) Радиоактивность от угольных электростанций: обзор. *Журнал окружающей среды Радиоактивность*, **4**, 177-204.
- Такемура Т., Накамура Х., Такигава М. *et al.* (2011) Численное моделирование глобального перенос атмосферных частиц, выброшенных атомной электростанцией "Фукусима-Дайити". *Сора*, **7**, 101-104. Терада Х. и Чино М. (2008) Разработка модели рассеивания в атмосфере для аварийный выброс радионуклидов с функцией одновременного прогнозирования для нескольких областей и его оценки применительно к аварии на Чернобыльской АЭС. *Журнал ядерной науки и технологий*, **45**, 920-931.
- Тодд Дж.Ф., Вонг Г.Т.Ф., Олсен К.Р. и Ларсен И.Л. (1989) Атмосферные осадки характеристики бериллия-7 и свинца-210 вдоль юго-восточного побережья Вирджинии. *Журнал геофизических исследований*, **94**, 11106 -11116.
- Турекян К.К., Беннингер Л.К. и Дион Э.П. (1983) Потоки Ве и ²¹⁰Pb общего осаднения Pb в Нью-Хейвене, Коннектикут и на Бермудских островах. *Журнал геофизических исследований*, **88**, 5411- 5415.
- Турекян, К.К. и Кокран, Дж. К. (1981) ²¹⁰ Содержание Pb в приземном воздухе в Энниветак и Азии пыль до Тихого океана. *Природа*, **292**, 522-524.
- Андервуд, Б.Ю. (2001) *Обзор скорости осаднения и коэффициента вымывания, АЕА* Технология, Харвелл.
- НКДАР ООН (2000) *Источники и воздействие ионизирующего излучения: Источники*, Т. 1, Организация Объединенных Наций, Нью-Йорк, стр. 654.
- Государственный комитет СССР по использованию атомной энергии (1986) Авария на Чернобыльская атомная электростанция и ее последствия, серия безопасности № 75-INSAG-1. МАГАТЭ, Вена. Викторова Н.В. и Гаргер Э.К. (1990) Биологический мониторинг осаднения и транс-- перенос радиоактивных аэрозольных частиц в зоне влияния Чернобыльской АЭС, Материалы семинара ЦИК по сравнительной оценке воздействия на окружающую среду радионуклидов, выброшенных во время трех крупных ядерных аварий, Кыштым, Виндскейл, Чернобыль, EUR 13574, стр. 223-236. Уорнек, П. (1988) *Химия естественной атмосферы*, Academic Press, Сан-Диего, Калифорния, стр. 360 - 373.
- ван дер Верф, Г. Р., Рандерсон, Дж. Т., Джильо, Л. *et al.* (2006) Межгодовая изменчивость глобальных выбросов выбросы от сжигания биомассы с 1997 по 2004 год. *Химия и физика атмосферы Обсуждения*, **6**, 3423-3441.

Винкельманн И., Эндрулат Х.-Дж., Фуаснон С. *et al.* (1987) *Измерения радиоактивности в Федеративной Республике Германия после аварии на Чернобыльской АЭС*, Institut für Strahlenhygiene des Bundesgesundheitsamtes, Neuherberg.

Винклер Р., Дитл Ф., Франк Г. и Чирш Дж. (1998) Временные изменения ^{90}Sr и ^{137}Cs в

Распределение ^{90}Sr по размерам в окружающем аэрозоле. *Атмосферная среда*, **32**, 210-215.

Ясунари, Т.Дж., Столл, А., Хаяно, Р.С. *et al.* (2011) Осаждение ^{137}Cs и загрязнение

загрязнение почв Японии в результате аварии на АЭС "Фукусима". *Труды*

Национальной академии наук Соединенных Штатов Америки, **108**, 19530-19534.

Янг Дж.А. и Силкер У.Б. (1980) Скорости осаждения аэрозолей в Тихом океане и

Атлантический океан рассчитан на основе измерений ^{90}Sr . *Письмо о планетологии Земли*, **50**, 92-104.

Ю, К. Н. ли, Л. Ю. Л. (2002) измерение свойства атмосферы с использованием высокой

эффективность гамма-спектроскопии.

Применяемое излучение и изотопы

, **57**, 941-946.

Указатель

- показатель поглощения аэрозоля 126, 128
- эффективность адгезии 104
- аэродинамический диаметр 6, 33, 228, 253, 399
- аэродинамический дозатор частиц 71
- AERONET 121, 122, 124, 134, 194 аэрозоли
- режим накопления 16, 45, 182, 348, 369, 372, 375
- аэродинамический диаметр 6, 33, 228, 253, 399
- Режим Эйткена 16, 45, 155, 182, 348
- Броуновская диффузия 36, 80, 96, 104, 350, 448
- Броуновское движение 18, 28, 34, 91, 97, 104
- химический состав 5, 10, 45, 57, 78 -80, 160, 194, 198,
- 348 классическая теория зарождения
- 20 влияние климата
- прямое 182, 190
- первое косвенное воздействие 184, 194
- второе косвенное воздействие 184
- крупная фракция 9, 16, 45, 182, 208, 348, 369
- коагуляция 27- 31
- Броуновская коагуляция
- 28 коэффициент коагуляции
- 28, 182 конденсация 26,
- 182 определение 1
- диффузия 53, 91, 93, 96, 107, 227, 228
- коэффициент диффузии 33, 34, 51, 55, 96
- динамика 15-41
- динамический коэффициент формы 33, 228
- мелкая фракция 9, 16, 45, 123, 208, 348
- гравитационное осаждение 32, 33, 91, 93, 99, 100, 107, 350, 448
- инерционное воздействие 36, 91, 93, 99, 107, 227, 228, 253, 254 перехват
- 91, 93, 98, 107 логарифмически
- нормальное распределение 16
- длина свободного пробега 32
- механическая подвижность 32
- зарождение 19, 153-170
- однородный 19, 153
- гетерогенный 23, 155
- событие зарождения 154, 163, 165
- способ зарождения 15, 153, 348, 369, 372, 375, 381
- распределение
- численности 8, 369 первичные 4, 10, 188, 373 радиоактивные
- аэрозоли 441- 460 время
- релаксации 54 время
- пребывания 400, 454, 455
- вторичные 4 осаждение 53, 227, 228 форма 5
- изометрическая
- 5 тромбоциты
- 5 волокна 5
- распределение по размерам
- 6, 19, 70 диапазон
- размеров 2 диаметр Стокса
- 6 закон Стокса 32
- Число Стокса 34, 54, 98

аэрозоли (продолжение)

ультрадисперсная фракция 16, 45, 61, 207, 208, 348
 объемное распределение 8
 масс-спектрометры аэрозолей 79, 80
 оптическая глубина аэрозоля 120, 123, 128, 130, 131, 136, 140, 192, 193, 201
 масс-анализатор аэрозольных частиц 77
 масс-спектрометр времени пролета аэрозоля 79, 80, 161
 синтез на основе аэрозоля 292
 аэрозолизация бактерий 395
 активное высвобождение 397
 пассивное высвобождение 397
 агломерация 28, 300, 313, 369
 технологии очистки воздуха 282
 фильтрация 283
 отопление вентиляция и кондиционирование воздуха 283
 разбавление и направление воздуха 283 отключение 284
 ультрафиолетовое бактерицидное облучение 281, 284
 отрицательная ионизация воздуха
 284 пассивные системы 285
 спектрометр аэроионов 160
 распылители с воздушной струей 238,
 241 загрязнение воздуха 209
 качество воздуха 4, 140, 216
 передача заболеваний воздушно-капельным путем 345, 354 соотношение воздух-топливо 370, 371 Режим Эйткена 16, 45, 155, 182, 348 Показатель Ангстрема 121 антропогенные радионуклиды 444, 445 эффективность аспирации 63
 сборка наноструктур 314-322
 астма 222, 223, 237 испытания
 ядерного оружия в атмосфере 444, 457
 образование ядер в атмосфере 24, 155, 160, 169 время пребывания в атмосфере 46
 бактериальные кластеры 429
 бактериальные эндоспоры 421, 422
 закон бира-Ламберта 192
 пробоотборники биоаэрозоля 402, 403

биоаэрозоли 11, 271-285, 393-409, 417 - 435
 биологические опасности 351-357
 технический углерод 122, 124, 183, 187, 201, 203 Броуновская диффузия 36, 350, 448 Броуновское движение 18, 33 искусственная среда 345- 361
 сердечно-сосудистые исходы 215
 транспорт, опосредованный переносчиками 230 каскадные факторы воздействия 72, 73 повреждение клеток 423, 424 цетановое число 385
 химическая ионизация (квадрупольная) масса спектрометр 162
 Чернобыль 441, 444-447, 449, 450, 452 - 457
 хроническая обструктивная болезнь легких 222, 224, 237
 классическая теория зарождения 20
 чувствительность к климату 200
 закрытая система вентиляции картера 375 *Clostridium difficile* 281
 эффект альbedo облаков 184 ядра конденсации облаков (CCN) 121, 164, 170, 186, 194, 198, 395, 404, 406 эффект продолжительности жизни облаков 184
 обработка облаков 182 крупная фракция 9, 16, 45, 182, 208, 348, 369
 эффективность сбора 90
 функция частоты столкновений 18 составные X 168 двигатели с воспламенением от сжатия 372
 ядра конденсата 182, 199
 счетчик частиц конденсата 65, 66, 68, 75, 156-158, 167, 380, 381
 пробоотборник постоянного объема 378, 379
 конструктивное производство частиц 235
 космогенные радионуклиды 442
 центробежный масс-анализатор частиц куэтта 77
 Поправочный коэффициент Каннингема 32, 98
 циклоны 63, 64 муковисцидоз 224

- механизмы осаждения 32, 91 скорость
осаждения 35, 448 катализатор
окисления дизельного топлива 375
- сажевый фильтр дизельного топлива 374, 377, 379,
386, 387, 388
- анализатор дифференциальной подвижности 75, 76, 159
анализатор частиц дифференциальной подвижности 75, 81,
159
- спектрометр дифференциальной
подвижности 76,
382, 384
- диффузионные батареи 77
коэффициент диффузии 33, 34, 51, 55, 96
диффузионные сушилки 51
диффузионное пламя 371
диффузионный ограниченный кластер-cluster
агрегация 30
- диффузия 53, 91, 93, 96, 107, 227,
228
- диметилсульфид 187
- дискретный гранулометрический
состав 18 дезинфекция 429,
430 каркас днк 314
- образование капель 238
- сухое осаждение 448 вдыхание
сухого порошка 248 - 251
- псевдооживление
порошкового слоя 249 захват частиц 249
- деагломерация 249
порошковые составы 250
- пыль 3 динамический
коэффициент формы 33, 228
- электрические анализаторы аэрозоля 74
- электрический ударный элемент низкого давления 73, 382,
384
- электростатическое притяжение 91, 93, 100
равномерно заряженные волокна 101
волокна с неоднородным зарядом 102
нейтральное волокно, заряженные частицы 103
внешние электрические поля 103
электростатические и механические воздействия
104
- энергоэффективные строительные
среды 359 инженерные наночастицы 61, 109,
291-322, 327 - 336
- воздействие на окружающую среду 329 - 336
- экотоксичность 329, 335
риски для здоровья 330- 334
- табачный дым в окружающей
среде 211 эргономические опасности
358 скорость испарения 21, 26
ex vivo модели 231 рециркуляция
выхлопных газов 386
воздействие 209, 215, 345-361
внегрудная фракция 348
- Первый закон диффузии Фика
33, 229 фильтрация 89
- поверхность
89 глубина 89
зернистость
90 ткань 90
мембрана 90
области применения 109
- мелкая фракция 9, 16, 45, 123, 208, 348
пламенный синтез 292-299 плотность
потока 400, 401 фрактальная
размерность 29-30, 31, 380, 382,
383, 384
- свободная энергия образования
21 Число Фруда 99 поправочный
коэффициент Фукса 26
состав топлива 385
Фукусима 444-448, 454-456
- газовые примеси 351 - 361
- сажевые фильтры для бензина 388
газотурбинные двигатели 373 модели
общей циркуляции 187, 198 общее
динамическое уравнение 17 глобальное
распределение аэрозолей 181, 186
глобальное потепление 120
- Вращающийся барабан Голдберга 280 гравитационное
осаждение 32, 91, 93, 99, 100,
107, 350, 448
темпы роста 165, 198
- инфекции, связанные со здравоохранением 353,
429
- Аппарат Хендерсена 280
Системы фильтрации HEPA 435
гетерогенное зарождение 19, 153

образование гомомолекулярных ядер 23,
155 госпитальные инфекции 271-285 дыхательные
пути человека 36, 212, 275

альвеолярная область 37, 69, 211, 212,
214 фракции отложений 37, 211
внегрудочная область 37, 211, 212
носоглоточная область 37, 211 трахеобронхиальная
область 37, 69, 211,
212

контроль влажности 49

КОНДИЦИОНЕР 283, 285,
351, 360 HYSPLIT 405

ледяные ядра 395, 404,

407 воздействие 34, 53,

63 *in silico* модели 233

in vitro модели 232

in vivo модели 231

аэрозоли для помещений 345- 361

динамика частиц 349

источники 349

инерционное воздействие 36, 91, 93, 99, 107,

227, 228, 253, 254

инфекционный контроль 275-285

инфильтрация 349, 350,

360 вдыхаемая фракция

348 инструментарий 61

аэродинамический анализатор частиц

71 масс-спектрометры аэрозолей 79,

80 анализатор массы аэрозольных

частиц 77 масса аэрозоля во время полета

спектрометр 79, 80, 161

аэроионный спектрометр 160

масс-спектрометр химической ионизации (квадрупольный)

162

счетчик частиц конденсата 65, 66,

68, 75, 156, 157, 158, 167, 380, 381

пробоотборник постоянного объема 378,

379 центробежная масса частиц куэтта

анализатор 77 дифференциальный

анализатор подвижности 75, 76,

159

сепаратор частиц с дифференциальной подвижностью 75,

81, 159

спектрометр дифференциальной подвижности 76,

382, 384

диффузионные батареи 77

электрические анализаторы аэрозолей 74

электрический ударный элемент низкого давления 73,
382, 384

светорассеивающие фотометры 67

нанонейтральный кластер и аэроион

спектрометр 160

монитор нанометровой площади

поверхности 69, 81 нефелометры 67 спектрометр

нейтральных кластеров и аэроионов

160

анализаторы релаксационного

размера частиц орти

71

увеличитель размера частиц 165

оптический счетчик частиц 70, 71, 81

кварцевый микровес 66 сканирующий измеритель подвижности частиц
74,

159, 382

колеблющийся конический элемент

микробаланс 65, 66, 81, 380

Межправительственная группа экспертов по климату

Изменение 5, 120, 153, 185

перехват 91, 93, 98, 107

Международная комиссия по радиационной защите

36, 211

Число Кнудсена 26, 92

Теория Келера 195, 197, 198

Поток Кувабары 97, 98

ламинарный поток 54, 55, 156

лазерная абляция 291, 302

лазерный синтез 299 - 302

лазерно-индуцированный синтез 302 - 309

Болезнь легионеров 272, 356 светорассеивающие

фотометры 67 рассеивание

света на большие расстояния 402, 404, 405,

408, 409

отложение в легких 37, 69, 81, 210, 211, 226,

227

масс-спектрометрические методы

160 длина свободного пробега

32 механическая подвижность 32

горение металлического порошка

309- 313 микронизация 235

микроимпульсный лидар

126 Рассеяние Ми

192 теория Ми 190

многокомпонентная нуклеация 22

наноматериалы 291-323, 327-336

монитор нанометровой площади поверхности 69, 81

наночастицы 61, 76, 98, 103 156-163,

252, 284

наноструктурированные материалы

291-322 наноксерография 316,

317 природные радионуклиды 442,

443 распыленные аэрозольные

составы 237 распыленные средства

лечения заболеваний 237 распылители

43 нефелометры 67 спектрометр

нейтральных кластеров и аэроионов

160

образование зародышей 19 - 25

гомогенный 19

гетерогенный 23

событие зарождения 24, 25, 154, 163, 165

режим зарождения 15, 153, 348, 369, 372,

375, 381

оптический счетчик частиц 70, 71, 81

анализ органического углерода 57

параклеточный

транспорт 229 частицы

вероятность активации 24

истощение 233 отложение

201 электрическая подвижность

74 образование

(транспортные средства)

образование в цилиндре 373

эволюция в выхлопных газах 375

источники негорючих частиц

375 эволюция в

окружающей среде 376 загрузка 106

измельчение 233 отскок 104

анализаторы релаксационных

размеров 71 увеличитель

размеров 165 измерение

площади поверхности 68

твердые частицы 6, 15, 45, 57, 208, 212,

215, 370, 372, 375, 377, 385

ПРЕМЬЕР-министр₁₀ 6, 45, 47, 208, 215, 348

₂Премьер - министр₃ 6, 45, 47, 140, 208, 348, 399

твердые частицы органического

вещества 187 Число Пекле 96

проникновение 45, 54 - 56, 77, 90, 96, 106,

349

стойкие углеродные наноматериалы 328 - 335

стойкие неорганические наноматериалы

328-335

фармацевтические аэрозоли 221

- 225 форетические эффекты 34

термофорез 34

диффузиофорез 34

фоторемонт 424, 425

физические опасности 357

полиароматические углеводороды 373

пористость 89 порошкообразные

составы 250 осаждение

129 эффективность осаждения 184 предварительно

смешанный пламенный

ингалятор 371 дозированный

ингалятор под давлением

241-248

стратегии приготовления 242

пропелленты 242

аэроизоляция продукта 243

осаждение в легких 244

вспомогательные устройства 247

первичные биологические аэрозоли 393, 394

тестирование эффективности продукта 253

тестирование суммарной выброшенной

дозы 253 доставка лекарств в легкие 221 - 225

кварцевый микровес 66

радиационное воздействие 136, 153, 170, 193, 200,

202

радиоактивные аэрозоли 441-460

радиус обращения 29, 382, 383

Комбинационное рассеяние 320, 321

реакция ограничена кластер-скоплением

агрегация 30

время релаксации 54

накопление ослабленных вихрей 401

дистанционное зондирование 119

наземный 120

пассивный 120, 127

активный 126, 135

спутниковый 126

применение 136

время пребывания 400, 454,

455 вдыхаемая фракция 348

инфекция дыхательных путей

225 ресуспензия 38, 350, 450

монослой 38

многослойный 39

Число Рейнольдса 32, 53

выборка 45

общие рекомендации 46

контроль влажности 49

технология сушки 50, 53

конфигурации 53 впускные

отверстия 62 изокINETические

48, 56, 402 ограничения

размера 47 трубки

и разделители потока 47

потери 54 выбросы транспортных

средств 378-384

сканирующий измеритель подвижности частиц 74, 159,

382

поперечное сечение рассеяния 193

вторичные аэрозоли 182 вторичные

биологические аэрозоли 393 вторичный

органический аэрозоль 189, 190 полуплет-кие

органические соединения 57 тяжелый

острый респираторный синдром 271,

328, 355, 356

альbedo одиночного рассеяния 120, 121, 130,

131, 191

одноволоконная эффективность

91, 96, 98, 108 одностенные

нанотрубки 297, 298 дым 3,

372, 374 Уравнение

Смолуховского 18, 28

космический лидар 135 искровой

разряд 313 двигателя с

искровым зажиганием 371 распылительная

сушка 236 Диаметр

Стокса 6 закон Стокса 32

Число Стокса 34, 54, 98 зарождение

серной кислоты 166 солнечный

свет 419-421, 430, 431

сверхкритические флюиды 236

колебательные микровесы с коническим элементом

65, 66, 81, 380

термодинамический эквивалентный

диаметр 33 термогравиметрический

анализ 380 фракция выброса в

грудной клетке 348 излучение в верхней

части атмосферы 127, 132, 138

измерение общей массовой

концентрации 66 межклеточный транспорт 229

перенос в почве 457 тропосферные

процессы 394 туберкулез 272-274, 353,

355, 359 турбулентный поток 55, 56

двухтактные двигатели 372

ультрадисперсная фракция 16, 45, 61, 207, 208,

348

ультразвуковые распылители 239, 240, 241,

433 ультрафиолетовое бактерицидное облучение

281 верхних дыхательных путей 223

УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ излучение 418-430

экспозиция 425, 426

постоянная скорости 427, 428

восприимчивость 428

вегетирующие бактерии 422, 423

законодательство о выбросах транспортных средств

376, 377 вентиляция и экологические опасности

359

вентиляция 349, 350, 359-361

вирусы 11, 109, 182, 232, 273, 280, 353,

423

коэффициенты

вымывания 449 Модель Вейбеля 222

мокрое осаждение 449

мокрая очистка 35

дифракция рентгеновских лучей 301-303, 309, 311

Неравновесный фактор Зельдовича 22, 23