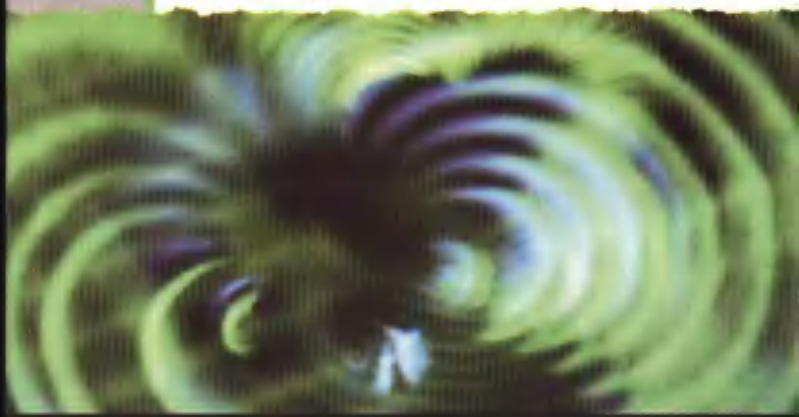


Тихонова И.О.
Тарасов В.В.
Кручинина Н.Е.

МОНИТОРИНГ
АТМОСФЕРНОГО
ВОЗДУХА



В. В. Тарасов, И. О. Тихонова,
Н. Е. Кручинина

МОНИТОРИНГ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

Допущено Министерством образования Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов учреждений среднего профессионального образования



МОСКВА
2008

УДК 65.290я723
ББК 658.012(075.32)
Т19

Рецензенты:

доктор химических наук, профессор Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева *Ю. В. Сметанников*;
доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная экология» Ивановского государственного химико-технологического университета *В. В. Костров*

Тарасов В. В., Тихонова И. О., Кручинина Н. Е.

Т19 **Мониторинг атмосферного воздуха: учеб. пособие. — М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2007. — 128 с. — (Высшее образование).**

ISBN 978-5-91134-189-3 (ФОРУМ)

В настоящем пособии к курсу «Экологический мониторинг» рассматриваются вопросы, связанные с составом атмосферного воздуха и проблемами, которые возникают при его загрязнении в результате антропогенной деятельности. Обсуждено влияние метеорологических условий на распространение загрязняющих веществ. Рассмотрены задачи и принципы организации систем мониторинга на глобальном и локальном уровнях.

Обсуждены особенности аналитических задач при мониторинге атмосферного воздуха. Содержатся сведения о методах и средствах контактных и дистанционных измерений загрязненности воздушной среды.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальностям «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов», «Инженерная защита окружающей среды», «Безопасность жизнедеятельности».

УДК 65.290я723
ББК 658.012(075.32)

© В. В. Тарасов, И. О. Тихонова,
Н. Е. Кручинина, 2008
© Издательство «ФОРУМ», 2008

ISBN 978-5-91134-189-3 (ФОРУМ)

Введение

Воздушная среда является наиболее подвижной из всех природных сред. Именно поэтому загрязняющие вещества (ЗВ) быстро распространяются на большие расстояния. По этой же причине те вещества, которые способны существовать в атмосфере в течение длительного времени без изменения, обнаруживаются повсеместно на нашей планете и называются глобальными загрязняющими веществами.

Именно свойство воздушной среды переносить ЗВ на большие расстояния от мест человеческой деятельности объясняет выражение: «Загрязнение не знает границ».

Роль атмосферного воздуха в формировании планетарных процессов настолько велика, что он стал первым объектом систематических наблюдений, проводимых после Стокгольмской конференции по окружающей среде (1972) в рамках так называемой системы глобального мониторинга (ГСМОС/GEMS). Именно ГСМОС позволяет получать информацию об изменениях климата и опасностях, связанных с нарушениями функционирования озонового «экрана» Земли, так же, как и о закономерностях функционирования биосферы и о влиянии на них антропогенных изменений состава атмосферы. Однако и на региональном, и на локальном уровнях необходимость систематических наблюдений за загрязнением воздушной среды во всех странах считается одной из важнейших задач рационального природопользования. В этих случаях мониторинг атмосферного воздуха рассматривают как информационную систему, служащую основой для принятия экологически значимых управленческих решений, направленных на улучшение качества среды обитания и на уменьшение вреда, наносимого биоте и абиотической составляющей.

Давно установлено, что качество атмосферного воздуха влияет на здоровье и благополучие человека. Особенно важной эта проблема становится в современных городах, степень загрязненности воздуха в которых автомобильным транспортом и промышленностью может быть очень высокой.

Данное пособие знакомит студента с организацией государственной системы мониторинга атмосферного воздуха в России (ГСНКА). Обсуждаются принципы функционирования этой системы, ее основные задачи и программы, позволяющие выполнять данные задачи. При изложении материала авторы пособия учитывали, что анализ качества атмосферного воздуха относится к так называемым аэроаналитическим задачам, требующим прежде всего понимания роли метеорологических условий и сложных физико-химических процессов, протекающих в атмосфере. Поэтому в пособие введены соответствующие разделы и рассмотрены особенности аналитических задач, связанных с вариабельностью концентраций ЗВ, с многокомпонентностью воздушной среды и низкими величинами ПДК.

1. СОСТАВ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

Состав атмосферы

Главными компонентами атмосферного воздуха являются газы, представленные в табл. 1.1 [5].

Таблица 1.1. Состав сухого незагрязненного воздуха

Газ	Концентрация по объему
Азот (N ₂)	78,084 %
Кислород (O ₂)	28,946 %
Аргон (Ar)	0,934 %
Диоксид углерода (CO ₂)	340 млн ⁻¹ (переменная)
Неон (Ne)	18,18 млн ⁻¹
Гелий (He)	5,24 млн ⁻¹
Метан (CH ₄)	1,3—1,6 млн ⁻¹
Криптон (Kr)	1,14 млн ⁻¹
Водород (H ₂)	0,5 млн ⁻¹
Оксид азота (N ₂ O)	0,25—0,35 млн ⁻¹
Ксенон (Xe)	0,087 млн ⁻¹

Аэрозоли в атмосфере

Совокупность мельчайших твердых частиц и капель, подверженных броуновскому движению и обладающих пренебрежимо малой способностью к седиментации, называется **аэрозолем**.

Обычно радиус аэрозольных частиц менее 1 мкм. Более крупные частицы принято называть пылью. Даже самый чистый атмосферный воздух всегда содержит аэрозоль, поскольку последний образуется в результате естественных процессов и без участия человека (почвенное и грунтовое пыление, вулканическая деятельность, океанический солевой аэрозоль, лесные пожары). Представление о мощности источников естественного поступления аэрозолей в атмосферу дает табл. 1.2.

Таблица 1.2. Источники поступления аэрозольных частиц в атмосферу

Источник	Мощность, Мт/год
Морская соль	1500
Пыление почв	750
Вулканическая деятельность	50
Лесные пожары	35
Метеориты	1

Несмотря на свои малые размеры и невысокие концентрации аэрозольные частицы играют исключительно важную роль в формировании климата и тех рисков здоровью населения, которые всегда сопровождают человеческую деятельность. Особенно опасны радиоактивные аэрозоли. Многие реакции, в том числе и фотохимические, протекают с участием аэрозольных частиц, поверхность которых выступает как каталитическая.

Вода в атмосферном воздухе

Хотя объем паров воды в атмосфере составляет менее 2 %, ее следует рассматривать как важнейшую составляющую, определяющую протекание многих химических реакций в атмосфере и являющуюся основным источником гидроксил-радикалов. Последние, как известно, обуславливают трансформацию многих органических и неорганических веществ в атмосфере. Наличие паров воды — обязательное условие образования атмосферных смогов лондонского типа. Кроме того, вода влияет на правильность как пробоотбора, так и проведения ряда анализов. Многие вещества в следовых концентрациях сосредоточены в жидкока-

пельной фазе, а это означает, что время пребывания этих веществ в атмосфере полностью обусловлено временем пребывания в ней воды. Среднее время пребывания воды в атмосфере — 10 сут., хотя оно может возрастать до 15 на полюсах и уменьшаться до 7 сут. в средних широтах.

В составе сухого незагрязненного воздуха (см. табл. 1.1) вода не упоминается лишь вследствие высокой вариабельности своих концентраций. Одна из причин вариабельности — изменение парциального давления паров воды в зависимости от температуры. Именно поэтому содержание воды в воздухе снижается при перемещении к полюсам и по мере подъема в верхние слои атмосферы.

Природные органические вещества

Наличие растительной и животной жизни на Земле — основная причина присутствия в атмосферном воздухе небольших по количеству, но важных по следствиям органических веществ [4]. Часть из них, например метан, ответственны за климатические изменения, так как усиливают парниковый эффект. Другая часть участвует в реакциях, определяющих образование смогов, а также в важнейших атмосферных процессах с участием свободных радикалов.

В табл. 1.3 приведены сведения об уровнях концентраций некоторых углеводородов в атмосферном воздухе различных районов Земли. Информацию о содержании органических веществ в атмосфере можно найти у В. М. Эльтермана [3].

Таблица 1.3. Концентрации углеводородов в воздухе (млрд⁻¹)

Углеводород	Лесной воздух	Другие районы
Метан	—	1600 (фон)
Этан	2,5	0,05 (Арктика)
Этилен	0,05	—
Ацетилен	0,4	0,1 (в чистых районах)
н-Бутан	0,6	0,07 (Арктика)
α-Пинен	0,035	0,2 (хвойные леса США)

Заметим, что концентрация метана, одного из главных компонентов атмосферы, имеющего в основном природное происхождение, непрерывно возрастает. Например, 20 лет назад концентрация метана была на уровне 1460 млрд^{-1} (по данным станции наблюдения Кейн-Грим на острове Тасмания).

Метан относится к парниковым газам, участвующим, кроме того, в образовании озона в тропосфере. Концентрация этого постоянного компонента атмосферы подвержена сезонным изменениям. Максимумы приходятся на весну и осень, минимумы — на зиму и лето. Кроме того (по вполне понятным причинам), наблюдается весьма существенная пространственная (географическая) неоднородность содержания метана в атмосфере. Наиболее высокое содержание метана, порой достигающее 5000 млрд^{-1} , обнаружено в воздухе над нефтяными, газовыми и каменноугольными провинциями, а также над сейсмически и тектонически активными районами. Самые низкие концентрации — в воздухе высокогорных районов.

Некоторые техногенные загрязняющие вещества в атмосфере

Разнообразные технологические процессы и виды человеческой деятельности являются источником многочисленных газовых примесей в атмосфере. Ниже будут рассмотрены только те из них, которые имеют достаточно большое время жизни в атмосфере и/или поступают в нее в больших количествах. Именно поэтому их можно обнаружить на большом отдалении от источников. К таким примесям относятся, прежде всего, диоксид серы (SO_2) и монооксид углерода (CO), выбрасываемые в больших количествах предприятиями цветной металлургии и тепловыми электростанциями (SO_2), а также предприятиями черной металлургии (CO).

Знание уровня их концентраций в регионах важно, поскольку нормирование выбросов зависит от величины фоновых концентраций нормируемых веществ. Региональные фоновые концентрации SO_2 и CO колеблются в весьма широких пределах, оставаясь все же ниже $\text{ПДК}_{\text{сс}}$.

Превышения концентраций примесей над фоновыми в среднем составляют: CO — 80—1250 раз, SO_2 — 50—300, NO_2 — до 25, O_3 — до 7 раз.

Озонразрушающие галогенсодержащие соединения

Галогенсодержащие производные углеводородов (ГСПУ) являются одной из наиболее интенсивно изучаемых групп органических компонентов атмосферы со времен опубликования работ Роуланда и Молины, содержавших гипотезу о разрушении озонового стратосферного слоя Земли вследствие эмиссии фреонов — фторхлоруглеводородов (ФХУ). Последние поступают в атмосферу в основном из антропогенных источников, однако, имея большое время жизни, они стали почти постоянным компонентом атмосферы. Вещества, которые повсеместно обнаруживаются благодаря своему длительному времени жизни, как уже говорилось, называют глобальными ЗВ (обычно они имеют время жизни в атмосфере более 1 года). В табл. 1.4 приведены данные о содержании летучих галогенуглеводородов, включая и ФХУ в атмосфере городов.

Очень характерные для углеводородов (например метана) сезонные вариации концентраций в случае галогенуглеводородов наблюдаются только для компонентов, содержащих в молекуле атомы водорода или двойные связи (фреон-22, CH_3Cl , C_2Cl_4 , CH_3Br и т. п.). Минимумы приходятся на летний период, причем амплитуды колебаний наиболее отчетливо просматриваются в Северном полушарии.

Таблица 1.4. Примеры галогенсодержащих соединений в атмосфере

Название	Концентрация, трлн ⁻¹	
	фоновая	в атмосфере городов
Метилхлорид	480—640	480—7700
Винилхлорид	<5	10—1200
1,2-Дихлорэтан	5—37	28—1350
Хлороформ	8—21	13—225
Дихлордиформетан	230—320	270—2400
Фтортрихлорметан	130—200	130—6000
Тетрахлорметан	95—135	95—1400

Распределение ГСПУ по высоте почти отсутствует. Наиболее заметное изменение концентрации наблюдается в сравнительно тонком слое тропопаузы и в нижних слоях стратосферы.

Органические персистентные вещества

Человеческая деятельность породила целый ряд **ксенобиотиков** (т. е. чуждых биоте веществ), которые исключительно трудно разлагаются в природной среде под действием химических, фотохимических и биохимических процессов. Это свойство называют **персистентностью**. Из-за большого времени жизни, достигающего иногда десятков лет, такие вещества оказываются во всех географических зонах и во всех средах.

Главным переносчиком на большие расстояния оказывается воздушная среда. Даже несмотря на малые парциальные давления своих паров эти ЗВ обнаруживаются в повышенных концентрациях в таких труднодоступных регионах, как Арктика и Антарктика. Жидкие и твердые аэрозольные частицы играют при переносе исключительно важную роль, поскольку данные ксенобиотики «путешествуют» на частицах аэрозоля в адсорбированном состоянии. Переносу на малые и сверхмалые расстояния способствует такое свойство этих веществ, как **лиофильность**, позволяющая объяснить их концентрирование в жировых тканях живых организмов и в малополярных средах. Наоборот, водная среда чужда этим веществам.

Таким образом, все они обладают высокими значениями **константы распределения** между октанолом и водой ($K_{o/w}$) важнейшей характеристикой токсикологических свойств. Именно благодаря этому свойству вещества с большими величинами $K_{o/w}$ способны концентрироваться по **трофическим цепям**, что обуславливает возникновение все большего риска по мере продвижения от загрязненных сред к высшим организмам. Результирующие **коэффициенты концентрирования** по трофическим цепям могут достигать 10^7 . Так обстоит дело, например, с полихлорированными бифенилами (ПХБ).

Опасность супертоксикантов для человека определяется прежде всего именно способностью к аккумуляции в жировых тканях. При этом различные болезненные состояния развиваются не сразу, а спустя время, достаточное для накопления критических доз (табл. 1.5).

Таблица 1.5. ПДК и ОБУВ загрязнения атмосферного воздуха супертоксикантами

Вещество	ПДК или ОБУВ
Диоксины*	0,5 пг/м ³
3,4-бенз-а-пирен	0,1 мкг/100 м ³
Гексахлорциклопексан	0,03 мг/м ³
Полихлорированные бифенилы**	$3,5 \cdot 10^{-6}$ мг/м ³

* В пересчете на 2,3,7,8-тетрахлоро-п-дибензодиоксин.

** Федеральный норматив Канады.

В этом отношении органические персистентные супертоксиканты напоминают радиоактивные вещества. Отдельные из них обладают ярко выраженной **канцерогенностью**, другие проявляют **эмбриотоксичность**, третьи вызывают **мутации** у потомства. Часто действие не ограничивается только одним эффектом, а наблюдается комплекс негативных последствий. Многие из супертоксикантов влияют на иммунную систему и на репродуктивные функции.

Показатели качества атмосферного воздуха

Основными показателями качества атмосферного воздуха, характеризующими воздействие на природную среду, являются следующие:

- **критические нагрузки** — потоки массы в единицу времени в объект окружающей среды (см. табл. 1.6);
- **критические уровни концентрации загрязняющих веществ** — максимальные значения выпадений концентраций в атмосферном воздухе ЗВ, которые не приводят к вредным воздействиям на структуры и функции экосистем в долгосрочном плане.

Основные критерии опасности загрязнения воздуха основаны на санитарно-гигиеническом нормативе — **предельно допустимой концентрации (ПДК)** вредных примесей. В России при установлении ПДК принимается самый низкий уровень воздей-

ствия, когда еще не обнаруживается никакого прямого или косвенного вредного воздействия загрязнения на человека. Для оценки степени кратковременного воздействия примеси на организм человека применяются максимальные разовые ПДК, относимые к 20—30-минутному интервалу времени.

Согласно действующим положениям для некоторых ингредиентов можно суммировать их вредное воздействие. При наличии n таких ингредиентов соответственно с концентрациями C_i и предельно допустимыми концентрациями ПДК_{*i*} требуется, чтобы выполнялось соотношение:

$$\sum C_i / \text{ПДК}_i < 1. \quad (1.1)$$

Уровень загрязнения атмосферы обычно описывается набором статических характеристик для ряда измеряемых вредных веществ. Для оценки степени загрязнения атмосферы средние (максимальные) концентрации веществ нормируются на величину средней (максимальной) концентрации для большого региона или на санитарно-гигиенический норматив (ПДК).

Нормированные характеристики загрязнения атмосферы иногда называют **Индексом загрязнения атмосферы (ИЗА)**. На практике используют большое количество различных ИЗА. Некоторые из них основаны на косвенных показателях загрязнения атмосферы, например, видимости атмосферы, коэффициенте прозрачности. Существуют различные ИЗА, которые можно разделить на две основные группы:

- единичные индексы загрязнения атмосферы одной примесью;
- комплексные показатели загрязнения атмосферы несколькими веществами.

К **единичным индексам** относятся:

- коэффициент для выражения концентрации примеси в единицах ПДК — (a), т. е. значение максимальной или средней концентрации, приведенное к ПДК:

$$a = C_i / \text{ПДК}_i. \quad (1.2)$$

Этот ИЗА используется как критерий качества атмосферного воздуха отдельными примесями;

- повторяемость (g) концентраций примеси в воздухе выше заданного уровня по посту либо по K постам города за год.

Это процент случаев превышения заданного уровня разовыми значениями концентрации примеси:

$$g = (m/n)100 \%, \quad (1.3)$$

где n — число наблюдений за рассматриваемый период; m — число случаев превышения разовыми концентрациями на посту;

- ИЗА I отдельной примесью — количественная характеристика уровня загрязнения атмосферы отдельной примесью, учитывающая класс опасности вещества через нормирование на опасность SO₂:

$$I = (Q_r / \text{ПДК}_{\text{cc}})^{K_i}, \quad (1.4)$$

где i — примесь; K_i — константа для различных классов опасности по приведению к степени вредности диоксида серы; Q_r — среднегодовая концентрация примеси.

Для веществ различных классов опасности K_i принимается:

Класс опасности	1	2	3	4
K_i	1,7	1,3	1,0	0,9

Расчет ИЗА основан на предположении, что на уровне ПДК все вредные вещества характеризуются одинаковым влиянием на человека, а при дальнейшем увеличении концентрации степень их вредности возрастает с различной скоростью, которая зависит от класса опасности вещества.

Данный ИЗА используют для характеристики вклада отдельных примесей в общий уровень загрязнения атмосферы за данный период времени на данной территории и для сравнения степени загрязнения атмосферы различными веществами.

К **комплексным индексам** относятся:

- комплексный индекс загрязнения атмосферы города (КИЗА) — это количественная характеристика уровня загрязнения атмосферы, создаваемого n веществами в атмосфере города:

$$I_n = \sum I_i, \quad (1.5)$$

где I_i — единичный индекс загрязнения атмосферы i -м веществом;

- комплексный индекс загрязнения атмосферы приоритетными веществами — количественная характеристика уровня загрязнения атмосферы приоритетными веществами, определяющими загрязнение атмосферы в города, рассчитывается аналогично КИЗА.

Нормирование выбросов

Для обеспечения необходимой чистоты воздушного бассейна необходимо нормировать вредные промышленные выбросы в атмосферу. В соответствии с нормативными документами в Российской Федерации устанавливаются **предельно допустимые выбросы (ПДВ) и временно согласованные выбросы (ВСВ)**.

По определению ПДВ — это количество выбросов от отдельных источников, при которых в районе их расположения с учетом действия окружающих источников концентрация примеси не превышает ПДК. В случаях когда установление ПДВ по объективным причинам невозможно, предусматривается поэтапное снижение выбросов и определение ВСВ.

Таким образом, мощность выброса $M = \text{ПДВ}$ или $M = \text{ВСВ}$, когда максимальная концентрация от источника c_{\max} удовлетворяет условию:

$$c_{\max} + c_{\text{фон}} < \text{ПДК}, \quad (1.6)$$

где $c_{\text{фон}}$ — фоновая концентрация.

Величины c_{\max} и $c_{\text{фон}}$ принимаются для неблагоприятных метеоусловий.

Таблица 1.6. Критерии загрязнения атмосферного воздуха по веществам, влияющим на наземную растительность и водные экосистемы

№	Показатели, мкг/м ³	Параметры		Норма	Время воздействия
		экологического бедствия	чрезвычайной экологической ситуации		
Критические уровни для наземной растительности					
1	SO ₂	>200	100—200	<20	Среднегодовое
2	NO ₂	>300	200—300	<30	Среднегодовое
3	HF	>20	10—20	<2—3	Долговременное воздействие
4	O ₃	>1500	1000—1500	<150	Максимальное за 1 ч
5	O ₃	>600	400—600	<60	Среднее в течение 3 ч
6	O ₃	>500	300—500	<50	Среднее с 9 до 16 ч

Окончание табл. 1.6

№	Показатели, мкг/м ³	Параметры		Норма	Время воздействия
		экологического бедствия	чрезвычайной экологической ситуации		
Критические нагрузки для лесных и водных экосистем					
7	Соединения S, г/м ² в год	>5,0	3,0—5,0	<0.32	Северные и Центральные районы
8	Соединения N, г/м ² в год	>4,0	2,0—4,0	<0.28	Северные и Центральные районы
9	Ионы H ⁺ , г/м ² в год	>300	200—300	<20	Северные и Центральные районы

Вопросы для самоконтроля

1. Каков современный уровень содержания CO₂ в атмосфере?
2. Чем обусловлено понижение уровня CO₂ в воздухе в летний период?
3. Каковы основные естественные источники поступления аэрозольных частиц в атмосферу?
4. Каково среднее время пребывания H₂O в атмосфере, и как оно зависит от географической широты?
5. Назовите основной компонент природного происхождения, вносящий значительный вклад в «парниковый» эффект в атмосфере.
6. Назовите основные техногенные загрязняющие газовые примеси в атмосфере.
7. Почему фреоны относят к глобальным ЗВ?
8. Приведите примеры персистентных органических веществ техногенного происхождения, обладающих высокой токсичностью.
9. Объясните понятие «индекс загрязнения атмосферы».
10. Какие виды ИЗА вы знаете?
11. В каких единицах измеряется ПДВ?
12. Как связаны между собой ПДК и ПДВ?

2. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Общая циркуляция атмосферы

Перенос веществ на большие расстояния, например, из северного полушария в южное, т. е. из мест наиболее интенсивной промышленной деятельности человека в места относительно менее нагруженные, происходит с воздушными потоками — ветрами. Известно, что существуют ветры, господствующие на протяжении большей части года. Они обусловлены общей циркулирующей атмосферой под действием разогрева воздуха солнцем. Определенный вклад в движение атмосферы вносит и вращение земли (**кориолисово ускорение**). Хотя общие причины и силы, приводящие к глобальным течениям хорошо определены, точность детального предсказания таких течений (предмет метеорологии) остается пока невысокой. Карты господствующих в течение года ветров (обычно зимой и летом) можно найти в литературе [1].

Для понимания особенностей загрязнения атмосферы не очень долго живущими примесями полезно представлять картину глобальной циркуляции воздуха в экваториальной области, где происходит «встреча» воздушных потоков северного и южного полушарий. Наличие так называемой области внутритропической зоны конвергенции (ВЗК), где сталкиваются пассаты, дующие всегда в сторону экватора, объясняет те трудности, которые встречаются на пути распространения загрязняющего вещества из одного полушария в другое (рис. 2.1). Этим, в частности, обусловлено то, что северное полушарие загрязнено (в среднем) сильнее, чем южное, по крайней мере относительно коротко живущими веществами (время жизни менее 1 года). Однако для вс-

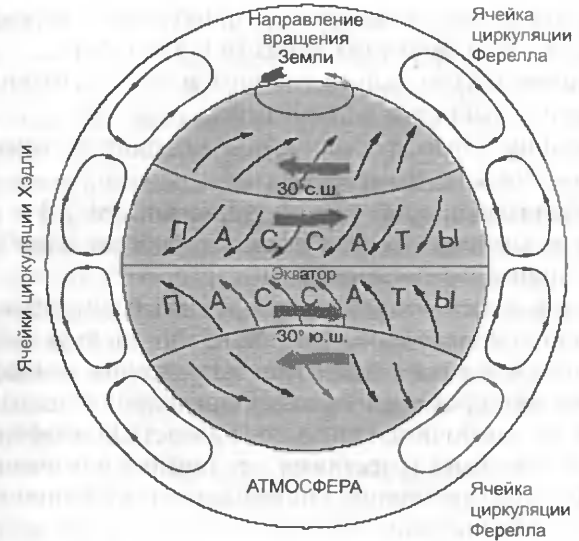


Рис. 2.1. Система конвективных ячеек межширотной циркуляции воздуха в атмосфере Земли

ществ с большим временем пребывания в атмосфере, например, для CO_2 или персистентных супертоксикантов, наличие ячеек в ВЗК почти не сказывается на их перераспределении между полушариями.

Распространение загрязняющих веществ с локальными воздушными потоками

Ни одно предприятие не может функционировать без выбросов в атмосферу или сбросов в водоемы или водотоки. Попадая в эти текущие среды, вещества должны быть как можно быстрее и тщательнее перемешаны с принимающей средой, чтобы концентрация в регламентируемых точках не превышала нормативные (допустимые) значения. При этом используют свойство текучих сред переносить вещество и момент количества движения во всех направлениях (в том числе и против основного потока). Такое свойство движений, если они упорядочены, связано с конвекцией, а при больших интенсивностях в случае потери дальнего порядка — с турбулентностью.

Существуют три механизма, приводящие к уменьшению концентрации загрязняющих веществ в атмосфере:

- **рассеяние** (путем конвективного и турбулентного перемешивания) выбросов в атмосфере;
- **деградация** (трансформация) в результате химических и биохимических процессов;
- **иммобилизация**, т. е. потеря подвижности ЗВ в результате физико-химических процессов адсорбции или биохимических процессов поглощения.

Рассеяние — основной и самый дешевый способ достижения существующих нормативов. Его, конечно, нельзя назвать идеальным с точки зрения устранения загрязнения атмосферы. Расчет делается на пороговый характер проявления негативных воздействий и на самоочищающую способность атмосферы. Движущей силой процесса рассеяния, с термодинамической точки зрения, является стремление системы к сглаживанию градиентов химического потенциала.

Деградация — термин, строго говоря относящийся к органическим веществам; для неорганических чаще используют термин трансформация. Отмечают химические, фотохимические и биологические виды деградации и трансформации. Трансформация неорганических веществ сопровождается изменением форм существования ЗВ (комплексообразование, гидролиз, реакции окисления-восстановления).

Механизмы рассеяния

Известны три механизма рассеяния ЗВ в атмосфере:

- молекулярная диффузия;
- конвективная диффузия;
- турбулентная диффузия.

Строго говоря, между двумя последними не существует большой разницы. В обоих случаях вещество переносится движением более или менее крупных элементов жидкости или газа.

Молекулярная диффузия — существенно иной механизм переноса массы. Здесь процессы протекают на молекулярном уровне, поэтому в данном случае речь идет о самостоятельном виде переноса массы, который может существовать и без конвекции или турбулентности. Однако проявляется он только на очень ма-

лых расстояниях или при очень малых временах развития процесса. Поэтому можно с уверенностью сказать, что молекулярная диффузия в «чистом виде» не представляет интереса для описания переноса веществ от источников на расстояния, рассматриваемые при мониторинге.

Ламинарные конвективные потоки в атмосфере также обычно не играют существенной роли при таких больших масштабах движений, которые реализуются на определяющем размере системы, как высота атмосферы. Известно, что переход от ламинарного течения к турбулентному определяет величина критического числа Рейнольдса (Re). Последнее зависит от высоты атмосферы в первой степени. Поэтому уже при весьма слабом ветре число Re велико и доминируют **турбулентное движение и турбулентная диффузия ЗВ**.

Источники ЗВ удобно представлять в виде геометрических образов (точки, линии, площадки) до тех пор, пока длина распространения ЗВ не станет подавляюще большой по сравнению с определяющим размером этого геометрического образа. Если это произошло, то образ любой формы и размера можно считать точкой и говорить о точечном источнике. Лишь при этом геометрические размеры источника не оказывают влияния на процесс распространения ЗВ.

В противном случае определяющий размер источника должен быть учтен при описании турбулентного переноса. В таком случае выделяют линейные, площадные и объемные источники. Примерами могут служить облако газа (объемный источник), город (при одних допущениях — площадной источник, а при других — объемный) или дорога (линейный источник).

В отличие от доминирующих глобальных ветров аэродинамическая обстановка в окрестности источника не обладает столь высокой консервативностью. Однако и здесь могут быть выделены преимущественные направления в действии ветров. По скорости последние классифицируются с использованием шкалы Бофорта (табл. 2.1).

Скорости ветра более 29 м/с приписывают 12 баллов и называют ураганом. Для рассеяния вредных веществ в атмосфере наибольшую опасность представляют штиль, нулевой и первый баллы скорости ветра.

Неустойчивость направлений ветра в течение года характеризуется величиной повторяемости ветра данного направления. Повторяемость — доля (процент) ветров, обладающих опреде-

Таблица 2.1. Шкала Бофорта

Баллы Бофорта	Характер ветра	Скорость ветра, м/с	Баллы Бофорта	Характер ветра	Скорость ветра, м/с
0	Штиль	0—0,5	6	Сильный	9,9—12,4
1	Тихий	0,6—1,7	7	Крепкий	12,5—15,2
2	Легкий	1,8—3,3	8	Очень крепкий	15,3—18,2
3	Слабый	3,4—5,2	9	Шторм	18,3—21,5
4	Умеренный	5,3—7,4	10	Сильный шторм	21,6—25,1
5	Свежий	7,5—9,8	11	Жестокий шторм	25,2—29,0

ленным баллом (скоростью). При климатологической обработке наблюдений над ветром можно для каждого данного пункта построить диаграмму, представляющую распределение повторяемости направлений ветра по основным румбам, в виде так называемой **розы ветров** (рис. 2.2). От начала полярных координат откладываются направления по румбам горизонта (8 или 16) отрезками, длины которых пропорциональны повторяемости ветров данного направления. Концы отрезков можно соединить ломаной линией. Повторяемость штилей указывается числом в центре диаграммы (в начале координат).

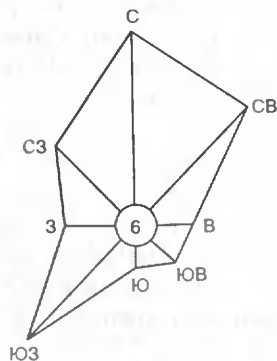


Рис. 2.2. Пример розы ветров

При построении розы ветров можно учесть также среднюю скорость ветра по каждому направлению, умножив на нее повторяемость данного направления. Тогда график покажет в условных единицах количество воздуха, переносимого ветрами каждого направления. Надо иметь в виду, что роза ветров не является чем-то

застывшим и вечным. Человеческая деятельность, приводящая к изменению ландшафтов, вызывает и изменение розы ветров.

По характеру движения воздушных масс атмосферу делят на следующие слои:

- пограничный, высотой 1000—1500 м, включающий приземный слой высотой 50—100 м (здесь турбулентность ограничивается процессами трения о поверхность Земли и зависит от ее рельефа и застройки);
- свободную атмосферу.

Турбулентность, развивающаяся при движении воздушных потоков, была предметом многочисленных исследований. Тейлор, Карман, Ричардсон, А. Н. Колмогоров, А. М. Обухова — вот далеко не полный список знаменитых исследователей, успешно описавших турбулентное движение воздуха [1].

В верхней части приземного слоя наблюдается крупномасштабная турбулентность, близкая к однородной и изотропной, т. е. та, которую можно было бы описывать, используя представления Колмогорова — Обухова. В нижней части приземного слоя масштаб турбулентных пульсаций уменьшается, а их частота возрастает. Применение теории Колмогорова — Обухова к описанию процессов рассеяния (диссипации) энергии (и вещества) в этой области не столь очевидно. Для случая изотропной турбулентности теория Колмогорова — Обухова дает для коэффициента турбулентного обмена A (аналог коэффициентов диффузии) следующее выражение:

$$A \sim \alpha \varepsilon^{1/3} l^{4/3}, \quad (2.1)$$

где A — коэффициент турбулентного обмена (переноса), $\text{м}^2\text{с}^{-1}$; ε — плотность диссипации энергии (иногда называют удельной скоростью диссипации энергии); l — определяющий размер движения (воздушного потока), в котором происходит турбулентное рассеяние вещества; α — коэффициент порядка единицы (табл. 2.2).

Таблица 2.2. Значения коэффициента α в формуле (2.1)

Доверительная вероятность величины α	Величина α (для A_{max} / для A_{min})
0,8	0,310/0,199
0,9	0,328/0,172
0,95	0,360/0,136

Самопроизвольное развитие турбулентности в атмосфере связано с гравитационной устойчивостью атмосферы, которая достигается в том случае, когда более легкие (менее плотные) слои воздуха располагаются над более тяжелыми (плотными). Поскольку между плотностью и температурой имеется прямая связь, выражаемая уравнением Клаузиуса — Клапейрона, можно ожидать, что устойчивая **стратификация** атмосферы будет в том случае, когда на всех высотах температура воздуха оказывается выше, чем по закону **адиабатического расширения**.

Последнее означает, что по каким-то причинам расширяющийся при поднятии вверх воздух охлаждается медленнее, чем по закону адиабатического расширения. Следствием гравитационной устойчивости атмосферы является то, что возмущения, зарождающиеся по каким-то причинам в потоке газа, имеют тенденцию не развиваться, а наоборот — гаснуть и рассеяние выбросов веществ происходит медленнее, в результате чего дольше сохраняется более концентрированный шлейф газа.

В метеорологии принято характеризовать процессы стратификации атмосферы величиной критерия Ричардсона (Ri):

$$Ri = g(\partial\rho/\rho\partial z)/(\partial u/\partial z)^2, \quad (2.2)$$

где g — ускорение силы тяжести $9,81 \text{ м/с}^2$; ρ — плотность среды, кг/м^3 ; $\partial\rho/\partial z$ — градиент плотности по вертикали, кг/м^4 ; $\partial u/\partial z$ — градиент скорости u в направлении z , с^{-1} .

Таким образом, *критерий Ri есть отношение факторов, стабилизирующих горизонтальное движение, к факторам, дестабилизирующим его*. Поперечные (вертикальные) пульсации переносят вниз более теплый воздух (против сил всплывания), а вверх — холодный воздух (против сил тяжести). На эти процессы в основном и тратится энергия ветра.

Критерий Ri является показателем возможности образования в атмосфере состояний, которые называются **инверсиями**. Инверсия — это такое состояние атмосферной стратификации, когда над слоем холодного воздуха находится слой теплого. Как уже говорилось, это соответствует гравитационной устойчивости атмосферы. Термин **инверсия** (переворот, изменение обычного хода событий) показывает, что более обычным является неустойчивое состояние, когда по мере набора высоты температура воздуха уменьшается. При инверсиях величина $\partial\rho/\partial z$ принимает

отрицательные значения ($Ri < 0$). Такой ход плотности и, соответственно, температуры называют **нададиабатическим**.

Наоборот, при $Ri > 0$ наблюдается неустойчивая температурная (плотностная) стратификация, когда над слоем теплого воздуха находится слой холодного, т. е. температура уменьшается при движении снизу вверх. Наблюдаются так называемые **сверхадиабатические условия**.

При $Ri = 0$ наступает нейтральная стратификация, когда плотность воздуха при его подъеме уменьшается не больше и не меньше, чем на $\partial\rho_a/\partial z$, т. е. в полном соответствии с адиабатическим градиентом плотности. Таким образом, высказанные выше утверждения о более теплых или холодных слоях нельзя понимать буквально. Нужно иметь в виду, что в общем случае речь идет о сравнении с температурой, которая была бы при адиабатическом расширении воздуха при его подъеме на данную высоту.

Из газовых законов следует, что

$$\Delta T/\Delta z = -M_{cp}g/C_p, \quad (2.3)$$

где ΔT — изменение температуры при изменении высоты на Δz ; M_{cp} — средняя молекулярная масса воздуха $0,02897 \text{ кг/моль}$; C_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении $29,05 \text{ Дж/(мольК)}$; g — ускорение силы тяжести $9,81 \text{ м/с}^2$.

Расчет показывает, что при этих значениях величина $\Delta T/\Delta z$ составляет около 1 К на каждые 100 м подъема. Естественно, эта величина отрицательная.

Распространение облака ЗВ в чистом воздухе при сверхадиабатических (гравитационно неустойчивых) условиях будет характеризоваться большими коэффициентами турбулентного переноса A и, как следствие, более быстрым рассеянием ЗВ. При нададиабатическом охлаждении (инверсии) воздух быстро теряет свою подъемную силу, так как охлаждается до температур несколько ниже, чем температура окружающей среды. Восходящий воздух, например из дымовых труб, не может при этом дальше подниматься вверх и сносится ветром в горизонтальном направлении.

Во второй половине дня **инсоляция** (прогрев природных сред солнцем) приводит к повышению температуры приповерхностного слоя атмосферы при относительно низких температурах верхних слоев. Следствие этого — нестабильные условия во вто-

рой половине дня. В ночное время преобладающий тепловой поток — это тепловое излучение поверхности Земли, которое приводит к охлаждению поверхности и прилегающего к ней слоя воздуха. Это способствует успокоению воздушных течений. Утром приповерхностный слой прогревается быстрее, чем более верхние слои, и вновь появляется турбулентность.

В дневное время приток тепла от солнца может стать причиной инверсии и застоя в верхних слоях приземного слоя. Такая инверсия, характеризующаяся высотой своего расположения и протяженностью ослабленного смешения, называется **приподнятой**. Если приподнятая инверсия находится несколько выше устья дымовой трубы, то дым может и не пробить слой ослабленного смешения и в таком случае выбросы прижимаются к земле.

На рис. 2.3 (схемы 1—5) дается типология ситуаций, возникающих при рассеянии шлейфов дымовых выбросов, в зависимости от характера плотностных и температурных стратификаций:

1 — надadiaбатические условия расширения газа, $Ri < 0$ на всех высотах, полная устойчивость, стабильный шлейф типа веера, когда рассеяние по горизонтали происходит намного более интенсивно, чем по вертикали;

2 — приподнятая инверсия над слоем нейтрального состояния, шлейф имеет тенденцию прижиматься к земле, создавая устойчивое загрязнение в приземных слоях;

3 — неустойчивая стратификация или ветровая турбулентность (задымленность или фумигация приземного слоя);

4 — нейтральная стратификация во всем приземном слое (конический шлейф), рассеяние происходит с равной вероятностью как по вертикали, так и по горизонтали;

5 — условия, когда в нижней части приземного слоя $Ri < 0$; выше нейтральная стратификация $Ri = 0$ или сверхadiaбатические условия $Ri > 0$, рассеяние вверх происходит легче, чем вниз.

С точки зрения рассеяния условия в коническом шлейфе (схема 4) удовлетворительны. Однако с позиции обеспечения безопасности населения следует предпочесть условия 1 и 5. Случай 3 приводит к резким флуктуациям приземных концентраций вблизи источника и к появлению переменной задымленности. В случае 2 создается устойчивое загрязнение приземных слоев вблизи источника, особенно опасное, если здесь расположены селитебные зоны.

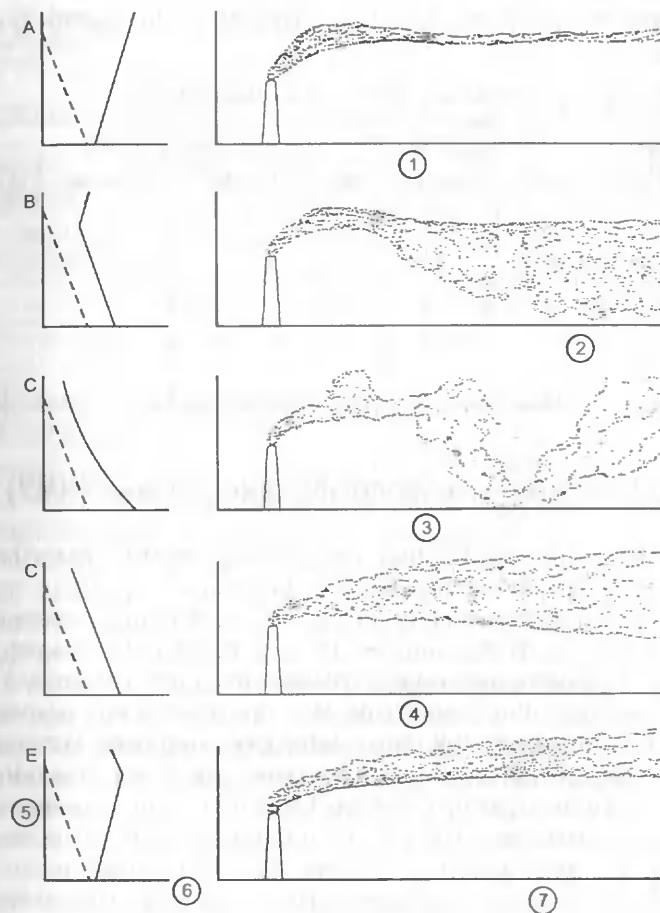


Рис. 2.3. Рассеяние шлейфов выбросов загрязняющих веществ: 1 — стабильный (веер); 2 — нейтральный внизу, стабильный сверху (дым); 3 — нестабильный (завихрение); 4 — нейтральный (конусный); 5 — высота; 6 — температура; 7 — стабильный внизу, нейтральный сверху

Для учета метеорологических условий в проблеме распространения выбросов из труб Пасквилл предложил пользоваться шестью классами устойчивости атмосферного воздуха, причем 1, 2 и 3 классы относятся к сильной, умеренной и слабой неустойчивости, соответственно, 4 класс относится к равновесному (или безразличному) состоянию, а 5 и 6 — к сильной и умеренной устойчивости. Каждому классу, как видно из табл. 2.3, соответ-

вует определенное значение скорости ветра, инсоляции и времени суток.

Таблица 2.3. Классы устойчивости атмосферы по Пасквиллу

Скорость ветра на высоте 10 м, м/с	Степень инсоляции днем			Облачность ночью, баллы	
	сильная	умеренная	слабая	10 (общая) или >5 (нижняя)	<4 (нижняя)
<2	1	1—2	2	—	—
2—3	1—2	2	3	5	6
3—5	2	2—3	3	4	5
5—6	3	3—4	4	4	4
>6	3	4	4	4	4

Неблагоприятные метеорологические условия (НМУ)

Во избежание повышения уровня загрязнения атмосферного воздуха при неблагоприятных для рассеяния вредных веществ метеорологических условиях последние необходимо прогнозировать и учитывать. В настоящее время установлены факторы, определяющие изменение концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе при изменении метеорологических условий.

Прогнозы неблагоприятных метеорологических условий могут составляться как для города в целом, так и для отдельных источников или их групп. Обычно выделяют три основных типа источников: высокие с горячими (теплыми) выбросами, высокие с холодными выбросами и низкие. Для указанных источников выбросов аномально неблагоприятные условия рассеяния примесей приведены в табл. 2.4.

Кроме перечисленных в табл. 2.4, к комплексам неблагоприятных метеорологических условий можно также отнести следующие:

1. Для высоких источников с горячими (теплыми) выбросами:

- высота слоя перемешивания меньше 500 м, но больше эффективной высоты источника;
- скорость ветра на высоте источника близка к опасной скорости ветра;
- наличие тумана и скорость ветра больше 2 м/с.

2. Для высоких источников с холодными выбросами: наличие тумана и штиль.

Таблица 2.4. Комплексы неблагоприятных метеорологических условий для источников разных типов

Источники	Термическая стратификация нижнего слоя атмосферы	Скорость ветра, м/с		Вид инверсии, высота над источником выброса, м
		на уровне флюгера	на уровне выброса	
Высокие с горячими выбросами	Неустойчивая	3—7	7—12	Приподнятая, 100—200
Высокие с холодными выбросами	Неустойчивая	Штиль	3—5	Приподнятая, 10—200
Низкие	Устойчивая	Штиль	Штиль	Приземная, 2—50

3. Для низких источников выбросов: сочетание штиля и приземной инверсии.

Следует также иметь в виду, что при переносе примесей в районы плотной застройки или в условиях сложного рельефа концентрации могут повышаться в несколько раз.

Инверсии

Из наблюдений за пульсациями скорости ветра следует, что в инверсионных слоях резко ослабляется турбулентный обмен. В случаях устойчивой стратификации при достаточно больших инверсионных градиентах температуры нередко отмечается почти полное исчезновение пульсаций. Записи акселерометров на самолетах в этих случаях выглядят как прямые линии с редкими длиннопериодными возмущениями, обусловленными мезомасштабной турбулентностью. То же можно сказать и о слоях приподнятой инверсии. В их пределах нельзя принимать величину коэффициента турбулентного обмена A_z постоянной, а следует учесть зависимость величины A_z от градиента температуры $\partial T/\partial z$:

$$A_z = A_z^{\text{pab}} (1 - Ri/Ri_{\text{кр}})^\alpha, \quad (2.4)$$

где A_z^{pab} — значение коэффициента турбулентного обмена в равновесных (адиабатических) условиях; α — коэффициент менее 1.

Более строгую модель изменения коэффициента турбулентного обмена A_z в слое приподнятой инверсии дает М. Е. Берлянд [3]. Из анализа полученных им уравнений следует, что наличие такого слоя над одиночным точечным источником (например,

дымовой трубой высотой h) приводит к увеличению приземной концентрации примеси в 1,5—2 раза, а иногда и больше. Дополнительно надо учесть и то негативное для рассеяния обстоятельство, что приподнятая инверсия влияет и на эффективную высоту трубы — это сумма реальной высоты трубы h и той добавки к ней, которая обусловлена скоростным поднятием дыма ΔH . Таким образом, эффективная высота трубы приблизительно равна:

$$h_{\text{эфф}} = H + \Delta h. \quad (2.5)$$

Однако инверсии, в том числе приподнятые, резко уменьшают величину Δh , а вместе с ней $h_{\text{эфф}}$ и успех рассеяния.

Повышение температуры с высотой приводит к тому, что выбросы из труб не могут подниматься выше определенного уровня — потолка, который для мощных тепловых электростанций составляет 200—800 м, а для холодных выбросов из труб небольшого диаметра — 20—40 м.

Туманы

Влияние туманов на содержание примесей сложное, так как при этом изменяются:

- профиль температуры (инверсии становятся приподнятыми);
- прозрачность воздуха и условия его прогревания.

Туманы делятся на **речные** и **радиационные**, происхождение которых понятно из названий. Теория речных туманов строится на основании численного решения уравнений тепло- и влагообмена в установившемся потоке воздуха, перемещающегося над рекой или водоемом. При этом холодный воздух, не насыщенный влагой, натаскает на более теплый воздух над рекой. Различия в температурах этих воздушных масс значительны, поэтому туманы такого рода наблюдаются осенью после ночных заморозков или зимой над незамерзшими водотоками и водоемами.

Для возникновения радиационного тумана не обязательно наличие водного объекта, однако необходимым условием его образования является ночное радиационное выхолаживание, приводящее к приземным инверсиям и устойчивости нижних слоев воздуха. В основу теории таких туманов положено совместное решение системы уравнений тепло- и влагообмена, а также уравнений теплопроводности почвы.

Из расчетов следует, что в газовой фазе туманов концентрация примесей резко уменьшается за счет поглощения примесей капельками воды. Казалось бы, этот процесс приводит только к перераспределению примесей между газовой и водной фазами, не изменяя суммарной объемной концентрации. Однако это не совсем так. В связи с наличием массообмена с соседними слоями воздуха, в которых нет капель тумана, а есть примеси, капли тумана обогащаются примесями до более высоких концентраций, чем можно было ожидать при отсутствии массообмена. Таким образом, при образовании тумана приземные слои концентрируют в себе гораздо больше вредных веществ, чем в его отсутствие.

Для учета наличия капелек воды используют уравнение турбулентной диффузии:

$$\partial c / \partial t + \sum_{i=1}^3 u_i \partial c / \partial x_i = \sum_{i=1}^3 (\partial / \partial x_i) A_i (\partial c / \partial x_i) - kc, \quad (2.6)$$

где c — концентрация примеси; u_i — компоненты скорости перемещения воздуха по координатам ($i = x, y, z$); x_i — координаты, в зависимости от i , принимающие смысл x, y или z ; A_i — коэффициенты турбулентного переноса (обмена); k — константа скорости химической реакции или процесса в котором расходуется примесь.

Если в уравнении (2.6) заменить величины A на D , т. е. на коэффициенты молекулярной диффузии, то оно превращается в уравнение конвективной диффузии, а если принять все компоненты скорости u , равными нулю, т. е. рассматривать неподвижную среду, то уравнение (2.6) переходит в известное уравнение молекулярной диффузии со стоком мощностью kc .

Мощность стока примеси в капельки тумана можно представить в виде интеграла:

$$kc = \int_0^{\infty} P(r) N(r) dr, \quad (2.7)$$

где $P(r)$ — количество примеси, поглощенной капельками тумана радиуса r в единицу времени; $N(r)$ — функция плотности распределения капель по радиусам.

Если примесь хорошо растворима, то:

$$P(r) = 4\pi Dcr. \quad (2.8)$$

Принимаем $N(r)$ в виде быстро затухающей с увеличением радиуса экспоненты:

$$N(r) = ar^2 \exp(-br), \quad (2.9)$$

где a и b — постоянные.

В таком случае константа скорости стока k , имеющая смысл удельной скорости абсорбции — α , может быть рассчитана:

$$\alpha = 0,6D\Delta/\rho_v r^2, \quad (2.10)$$

где D — коэффициент диффузии; Δ — водность, т. е. доля воды в воздухе; ρ_v — плотность воды.

Смоги

Дымотуманное состояние приземных слоев называется смогом. Смоги обычно сопровождают жизнь больших городов, если не устранены их первопричины антропогенного характера. Например, лондонский смог являлся дымотуманом, относящимся к группе серноокислотно-сульфатных аэрозолей. При этом в условиях сильных туманов на подстилающую поверхность выпадала морось, капли которой были обогащены серной кислотой. Наиболее интенсивное загрязнение воздуха наблюдалось в периоды зимних туманов при слабом ветре, дующем из индустриальных районов.

Смогами называют также и аэрозольное загрязнение воздуха, не сопровождаемое туманами. Впервые это явление отмечено в 30-е годы XX века в Лос-Анджелесе как результат сильного загрязнения воздуха автомобильными выхлопами в условиях значительной инсоляции приземных слоев. Этот тип сухого смога, имеющий фотохимическое происхождение, принято называть лос-анджелесским. Для него характерно образование значительных концентраций оксидантов, например озона. При этом ведущая роль в образовании озона принадлежит оксидам азота.

Потенциал загрязнения атмосферы (ПЗА)

Свойство атмосферы рассеивать ЗВ количественно определяется величиной так называемого потенциала загрязнения атмосферы — ПЗА, который введен в США и в последнее время ши-

роко используется в России [6]. Строгого определения данное понятие не получило. Из общих соображений ясно, что более высокий ПЗА соответствует таким метеорологическим условиям, при которых создаются более высокие концентрации примесей в приземном слое воздуха. Но даже при одинаковых метеорологических условиях источники разной высоты будут создавать различное распределение концентраций по высоте. Так, в случае высоких источников наибольшие концентрации у земли достигаются при опасной скорости ветра, имеющей существенные турбулентные составляющие сверху вниз (рис. 2.3, схема 3). Однако те же условия должны способствовать переносу примеси вверх от низких источников (например, автомобилей) и очищению приземных слоев. Ниже будут даны определения высокого и низкого источников.

Используемые обычно методы оценки ПЗА относятся, как правило, именно к низким источникам. Под высоким ПЗА понимают сочетание слабого ветра (4 м/с, т. е. 3 балла по шкале Бофорта) с наличием нисходящих потоков. Продолжительность такой обстановки должна быть примерно 36 ч. К высоким ПЗА относят также сочетание слабых ветров с приземными инверсиями температуры. Эту ситуацию называют также *состоянием застоя воздуха*.

Часто для характеристики устойчивости атмосферы, следовательно, и ПЗА используют *высоту слоя перемешивания* — L_0 . Эта величина подразумевает толщину слоя воздуха, в котором происходит основное рассеяние примеси. С уменьшением величины L_0 увеличивается загрязнение воздуха, поскольку уменьшается объем, в котором рассеивается примесь. Обычно величину L_0 определяют для дневного времени и антициклонической погоды, полагая при этом, что она равна высоте приземной инверсии к концу предшествующей ночи. Прогноз этой высоты часто осуществляется по данным аэрологического зондирования.

Зная величину L_0 , интенсивности источника выбросов M ($г/(с \cdot м^2)$) и скорости ветра u_0 , можно оценить среднюю концентрацию примеси c на городом протяженностью l_r :

$$c = Ml_r/2L_0u_0. \quad (2.11)$$

Величину c , в свою очередь, сравнивают со значением ПДК для данной примеси.

Сводные данные о высотах перемешивания над Россией можно найти в литературе. Наименьшая высота слоя перемешивания

вания, как правило, наблюдается в зимнее время. Так, для Якутска величина L_0 , составляющая в январе всего 120 м, повышается в мае до 1480 м, удерживается примерно на этом уровне до августа, а затем резко вновь уменьшается в осенне-зимнее время. Так же ведет себя и ПЗА.

Особенности течения воздуха в приземном слое

На течение воздуха в приземном слое существенное влияние оказывает рельеф подстилающей поверхности и наличие застроек [3]. Последние рассматриваются на масштабах течений как шероховатость поверхности трения. В литературе приводят опытные данные о профиле скоростей ветра в приземном слое, соответствующие логарифмическому закону. На поверхности Земли вследствие хорошо известного из гидро- и аэродинамики условия полного прилипания и нормальная, и обе тангенциальные составляющие скорости обращаются в ноль.

На рис. 2.4 показано, что происходит с профилем скорости ветра, если он набегаает на застройки, — образуется неравномерное поле скорости, характеризуемое высотой вытеснения. При уменьшении высоты неровностей высота вытеснения становится меньше, а профиль скорости — круче.

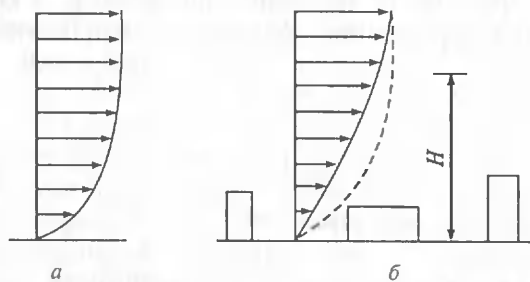


Рис. 2.4. Высота вытеснения в приземном потоке ветра: а — расположение преграды на шероховатой поверхности; б — расположение преграды в среде застройки

Наибольшую деформацию потока ветра создают сплошные здания и строения. Срывы потока с кромок зданий создают в основном потоке ветра турбулентность, значительно превышающую существовавшую в нем до встречи со зданием. Вокруг зда-

ний образуются зоны с течениями, отличающимися от течений в невозмущенном потоке. В зависимости от размера препятствия, измеряемого вдоль потока (будем называть этот размер шириной), выделяют два вида обтекания: обтекание узкого (как экран) здания (рис. 2.5) и широкого. При этом предполагается, что длина здания, т. е. его размер в направлении, перпендикулярном потоку, равна бесконечности. Практически можно считать, что при длине здания $l > 10h_{зд}$ ($h_{зд}$ — высота здания) в его средней части картина потоков будет такой, как показано на рис. 2.5.

В зоне I наблюдается логарифмический профиль скорости невозмущенного потока, зависящий от степени шероховатости подстилающей поверхности.

В зоне II перед зданием создаются условия для циркуляции, причем у поверхности земли направление движения воздушных масс противоположно главному направлению ветра.

Зона III также является циркуляционной, и в этом случае у поверхности наблюдаются обратные потоки.

Зона IV ограничивается изотаксой $u/u_0 = 0,95$ (где u_0 — скорость невозмущенного потока). При таком условии размеры следа ограничены и составляют $17h_{зд}$. Однако теоретически след (без ограничений изотаксой) простирается до бесконечности (возмущение асимптотически угасает).

С точки зрения загрязнения приземного слоя наибольшую опасность представляет зона III, т. е. зона аэродинамической тени. Таким образом, необходимо уметь находить, исходя из ме-

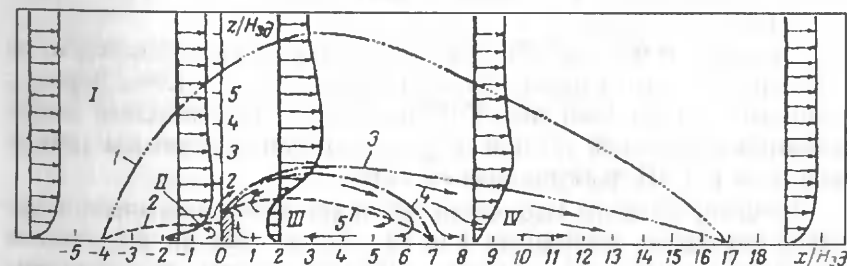


Рис. 2.5. Деформация приземного потока ветра узкой преградой: I — невозмущенный преградой приземный поток ветра; II — зона подпора; III — зона аэродинамической тени; IV — зона следа; 1 — граница зоны возмущения; 2 — граница циркуляционной зоны подпора; 3 — граница зоны следа; 4 — граница циркуляционной зоны аэродинамической тени; 5 — линия нулевых скоростей в циркуляционной зоне динамической тени

теорологических условий и строительных данных, протяженность мест наибольшего потенциального загрязнения.

Над широкими зданиями и за ними также создаются зоны с течениями, отличными от течений в невозмущенном потоке.

Неблагоприятные ландшафты

Часто источники приходится располагать на пересеченной местности. Тепловые электростанции и металлургические заводы требуют для нормального функционирования больших количеств воды и потому располагаются в поймах рек или прибрежных низинах. Жилые массивы при этом размещают на возвышенностях. При ветре со стороны, где расположены предприятия, здесь создаются значительные концентрации вредных веществ. В пониженных местах воздух застаивается, что весьма неблагоприятно сказывается на экологической обстановке.

Ветровая обстановка по мере развития промышленного узла существенно изменяется. Места, где раньше была благополучная обстановка, часто оказываются в сфере существенного влияния предприятий.

Существующая потребность в источниках энергии приводит к строительству тепло- или гидроэлектростанций. В последнем случае рядом с источниками интенсивного загрязнения воздуха возникают водохранилища, которые изменяют локальный климат и деформируют розу ветров, принятую в расчетах рассеяния при проектировании.

Подобного рода негативные эволюции можно проследить на примере Братского промышленного узла, где в низине рядом с водохранилищем Братской ГЭС находятся алюминиевый завод, лесопромышленный комплекс с целлюлозно-бумажным производством и ТЭЦ, работающая на угле.

Влияние рельефа местности на микрометеорологические условия учитывать затруднительно из-за многообразия возможных ситуаций на местности. Однако имеются некоторые качественные выводы и поправочные коэффициенты для расчетов рассеяния при ветре на пересеченной местности. Опытные данные различных авторов подтверждают закон Воейкова, согласно которому для вогнутых форм рельефа характерны более резкие изменения метеоусловий во времени и в пространстве, чем для

выпуклых. В пониженных местах в ночное время создаются более частые и мощные инверсии с пониженными скоростями ветра. Здесь нередко возникают те самые застойные явления, о которых говорилось выше при обсуждении причин высоких величин ПЗА.

В связи с рельефными особенностями и характером застройки важно учитывать соотношение высот ландшафтных элементов и источников (труб). Последние принято называть *высокими*, если их высота в 3,5 раза превышает высоту зданий или наивысших ландшафтных элементов (в [7] дается иное определение высокого источника — более 50 м). *Низкий* источник имеет высоту, немного превышающую высоту зданий.

Вопросы для самоконтроля

1. Какую роль в распространении загрязнений играют ячейки ВЗК?
2. Каковы механизмы рассеяния ЗВ?
3. Что такое роза ветров и как она строится?
4. Влияет ли хозяйственная деятельность человека на розу ветров?
5. Что такое пограничный приземный слой и свободная атмосфера и каковы их размеры?
6. Что такое температурная стратификация атмосферы?
7. Что означает критерий Ричардсона?
8. Что такое температурная инверсия?
9. Что такое приподнятая инверсия?
10. Поясните пять случаев распространения газовых факелов.
11. Что такое потенциал загрязнения земной атмосферы?
12. Как влияют здания и сооружения на профиль распределения скоростей ветра?
13. Какие ландшафты являются неблагоприятными с точки зрения распространения ЗВ?
14. Что такое высокий и низкий источники загрязнения?

3. МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

Для осуществления прогнозов возможных изменений окружающей природной среды в любом масштабе (от глобального до локального) необходимо располагать данными, во-первых, о современном состоянии окружающей среды, во-вторых, о планах хозяйственной деятельности на рассматриваемой территории и, в-третьих, представлять, хотя бы приблизительно, как природная среда будет реагировать на планируемую хозяйственную деятельность.

Когда говорят «прогноз», подразумевают некоторую модель (в естественной и технической областях знания она часто строится при помощи широкого набора конструкций и средств современной математики), описывающую процесс, результаты которого хотят предвидеть.

Модели, направленные на составление глобальных экологических прогнозов, теоретически должны отвечать тем же требованиям, что и любая математическая модель. Это прежде всего *адекватность (соответствие) исследуемому объекту или явлению*. Также для практики важно, чтобы модель позволяла обобщать доступные наблюдения и на этой основе предвидеть возможное развитие событий — как эволюционное (плавное, непрерывное), так и революционное (скачкообразное, катастрофическое) с достаточной высокой степенью точности. Однако даже самая адекватная и замечательная своей точностью предсказания модель может оказаться бесполезной из-за ненадежной информации, которая в эту модель вводится. Следует помнить, что прогнозирование — всего лишь средство для принятия рациональных управленческих решений (в том числе на уровне мирового сообщества). Значит, рациональность управления является функцией адекватности модели и качества информации.

На современном этапе развития биосферы экологическое прогнозирование должно осуществляться на всех уровнях (от

глобального до локального) постоянно. Поэтому деятельность по осуществлению прогнозирования должна быть систематизирована примерно следующим образом:

1. Разработка адекватных математических моделей, отражающих изменения, происходящие в природной среде под воздействием хозяйственной деятельности.

2. Своевременное обеспечение подсистемы моделирования качественной информацией о состоянии природной среды и параметрах функционирования техносферы (основывается на деятельности подсистемы сбора и обработки информации, корректирующей, если это необходимо, искаженные данные при помощи соответствующих математических методов, для чего проводится контроль достоверности данных).

3. Согласованная работа подсистем регионального, государственного и глобального экологического прогнозирования, включающая в себя ретроспективный анализ существующих прогнозов с целью корректировки математических моделей, на основе которых они были выполнены.

Методы прогнозных исследований в экологии

Опыт проведения прогнозных исследований в различных областях общественной жизни, науки и техники позволил выявить ряд методов, которые могут эффективно применяться для прогнозирования развития экологической ситуации. Любая типовая методика прогнозирования включает следующие необходимые элементы:

- выполнение предпрогнозной ориентации (определение предмета, целей, задач и периода упреждения);
- создание предпрогнозного фона (сбор и анализ данных в интервале ретроспекции);
- формирование исходной базовой модели и конструирование поисковой модели, ее верификация, а при необходимости — уточнение (корректировка), подготовка, обоснование и принятие необходимых решений.

Поскольку узловым этапом является построение модели прогноза, известные методы прогнозирования удобно классифицировать, разделив их на три группы:

- 1) эвристические;

- 2) аналитические;
- 3) статистические.

Эвристические методы включают построение интуитивных прогнозных моделей, которые формируются экспертами на основе целевой установки на выполнение прогноза, предоставляемой эксперту информации, опыта, интуиции и знаний эксперта. Данные методы используют в тех случаях, когда применение строгих математических моделей не обеспечивает достоверных результатов прогноза из-за того, что лежащие в их основе предположения не соответствуют реальным свойствам поведения прогнозируемого процесса или объекта.

Аналитическими методами прогнозные модели получают в тех случаях, когда известны общие закономерности развития процесса, его общая структура, важнейшие аналитически выраженные функциональные связи, имеется опытная (контрольная) выборка, позволяющая проверить работоспособность модели.

К **статистическим** относятся методы, основу которых составляет формирование стохастических моделей прогнозирования. Предпосылкой применения таких методов является наличие необходимых статистических данных, характеризующих период ретроспекции, и сведений, необходимых для определения модели прогноза. Широкое применение в прогнозировании статистических методов объясняется тем, что предметом статистики служит изучение методов выявления закономерностей массовых процессов. Развитый математический аппарат и накопленный опыт применения делают привлекательным обращение к статистическим прогнозным методам и моделям.

Следует заметить, что большинство методов, ориентированных на прогнозирование экологических ситуаций, требует в той или иной степени учета фактора старения используемой информации.

Модели прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха

Рассмотрим систему прогнозирования качества атмосферного воздуха, которая находит сегодня широкое применение для оперативного и долгосрочного прогнозирования и для идентификации выбросов.

Для решения задач долгосрочного (от 4 суток до 1 месяца) и оперативного (от нескольких часов до 3 суток) прогнозирования положены известные подходы к моделированию распространения вредных примесей загрязнения в атмосферном воздухе и прогнозированию загрязнения атмосферного воздуха. Модели долгосрочного прогнозирования бывают прямого моделирования и расчетные.

Для долгосрочного прогнозирования чаще всего применяют расчетные (аналитические, аппроксимационные) модели, полученные на основе решения уравнений турбулентной диффузии. Это — модели «факела», «ящика», конечно-разностные.

В России наибольшее распространение получила модель М. Е. Берлянда. В соответствии с ней степень загрязнения атмосферного воздуха выбросами вредных веществ из непрерывно действующих источников определяется по наибольшему рассчитанному значению разовой приземной концентрации вредных веществ (c_n), которая устанавливается на некотором расстоянии (x_m) от места выброса при неблагоприятных метеорологических условиях, когда скорость ветра достигает опасного значения (V_m) и в приземном слое происходит интенсивный турбулентный обмен.

Модель позволяет рассчитывать поле разовых максимальных концентраций примеси на уровне земли при выбросе из одиночного источника и группы источников, при нагретых и холодных выбросах, а также дает возможность одновременно учесть действие разнородных источников и рассчитать суммарное загрязнение атмосферы от совокупности выбросов стационарных и передвижных источников.

Эта модель положена в основу «Методики расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий» (ОНД-86), широко используемой для инженерных расчетов и реализованной в ряде программных комплексов для расчетов загрязнения атмосферного воздуха.

Расчеты с применением ЭВМ позволяют получить:

- значения максимальных концентраций примесей в узлах расчетной сетки, $\text{мг}/\text{м}^3$;
- значения максимальных приземных концентраций (c_m) и расстояний, на которых они достигаются (x_m), для источников выбросов вредных веществ;
- сведения о доле вклада основных источников выбросов в узлах расчетной сетки;

- карты загрязнения атмосферного воздуха (в долях ПДК_{мр});
- распечатку входных данных об источниках загрязнения, метеорологических параметрах, физико-географических особенностях местности;
- перечень источников, дающих наибольший вклад в уровень загрязнения атмосферного воздуха;
- другие данные.

Для оперативного прогнозирования широкое распространение получили статистические модели линейной и нелинейной регрессии. Их несомненным преимуществом является простота реализации и алгоритмизации. Основное ограничение применения данных моделей — отсутствие непосредственного учета физических особенностей процесса загрязнения воздуха, вследствие чего они характеризуются невысокой (хотя во многих случаях и приемлемой) точностью прогнозирования.

Для оперативного прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха при аварийных залповых выбросах следует использовать расчетные (аналитические) модели — модели «клубка», применяемые для прогнозирования распространения примесей от мгновенных точечных источников.

Прогностическое уравнение

Уравнение турбулентной диффузии (2.6), называемое часто уравнением турбулентного рассеяния, было впервые предложено для описания рассеяния веществ в атмосфере Тейлором (1915) и Шмидтом (1917) по аналогии с уравнением конвективной диффузии, в котором коэффициенты молекулярной диффузии D , формально заменены на некие новые транспортные коэффициенты A_i , получившие название коэффициентов турбулентной диффузии или турбулентного переноса. Это уравнение часто называют прогностическим, так как основная цель его использования — предсказание полей концентраций примесей (т. е. функций $c(x, y, z, t)$) в пространстве.

Все многообразие возможных ситуаций определяется начальными и граничными условиями, которые должны быть заданы заранее перед решением уравнения (2.6). Если задачу формулируют в декартовой системе координат, координату z направляют в зенит, а координату x — вдоль направления ветра. Тогда коор-

дината y оказывается направленной нормально движению воздушных потоков и параллельно Земле. Компоненты вектора скорости u_x, u_y, u_z соответствуют проекциям вектора скорости на соответствующие оси. Часто для упрощения написания эти компоненты обозначают $u_x = u; u_y = v; u_z = w$, а компоненты коэффициента турбулентного переноса A_i обозначают также символом k_i . Однако сохраним здесь обозначение A_i , чтобы не путать с константами скорости в члене, представляющем мощность стока.

Поскольку средняя скорость ветра относительно велика (по сравнению со скоростью турбулентного переноса примеси) и направлена вдоль координаты x , полагают, что $u = 0$, что означает движение примеси строго со скоростью ветра и пренебрежение эффектами опережения или отставания.

Самостоятельные вертикальные движения примеси в атмосфере над идеально ровной подстилающей поверхностью также малы и можно принимать величины $w = 0$. Однако это допущение справедливо лишь для так называемой легкой примеси, совершающей безынерционные движения совместно с элементами газового потока. Так ведут себя газовые примеси, находящиеся в «молекулярно растворенном» состоянии, а не крупные частицы пыли, оседающие по закону Стокса со скоростью $u_z = w = u_{ст}$.

При наличии ветра можно пренебречь членом A_x , принимая этот коэффициент равным нулю, что равносильно уже сделанному допущению о синхронном движении примеси с потоком ветра. Это означает, что диффузионный поток в направлении x много меньше, чем конвективный.

Член $\partial c / \partial t$, учитывающий нестационарность, также можно принять равным нулю, если рассматривать процесс за периоды времени много больше, чем l/u , где l — длина пути релаксации диффузионного процесса. Обычно она существенно меньше, чем расстояния, на которые осуществляется перенос примеси. За пределами участка l процесс считают стационарным или квазистационарным. Членом $\partial c / \partial t$ не следует пренебрегать только в отдельных случаях, например, когда необходимо рассчитать поля концентраций вблизи источника особенно в условиях штиля. Другой важный случай существенно нестационарного переноса соответствует условиям холмистой местности, когда ветер дует не горизонтально, а часто меняется по абсолютной величине и по направлению.

Граничные условия

При наличии точечного источника с координатами $(0, 0, z = h)$, в качестве первого (внутреннего) граничного условия принимают:

$$uc = M\delta(y)\delta(z - h), \quad (3.1)$$

где M — величина выброса примеси из источника в единицу времени (мощность источника); δ — дельта-функция.

Второе граничное условие (внешнее), задаваемое на бесконечно большом расстоянии от источника, имеет простой смысл:

$$x \rightarrow \infty \quad c \rightarrow 0; \quad y \rightarrow \infty \quad c \rightarrow 0; \quad z \rightarrow \infty \quad c \rightarrow 0. \quad (3.2)$$

Вообще говоря, нужно писать не $c \rightarrow 0$, а $c \rightarrow c_{\text{фон}}$, поскольку концентрация примеси может быть даже в совершенно «чистом» районе конечной величиной.

Чрезвычайно важным является граничное условие, которое отражает процессы на подстилающей поверхности. Здесь примесь может активно адсорбироваться (твердой поверхностью) или абсорбироваться (через водную поверхность). Когда процесс поглощения происходит с высокой скоростью и полностью необратим, можно считать, что на подстилающей поверхности со стороны движущегося воздуха концентрация примеси будет равна 0. Математически это обстоятельство отражается следующим образом:

$$c = 0 \quad \text{при} \quad z = 0. \quad (3.3)$$

Если на границе «воздух/подстилающая поверхность» устанавливается равновесие, то это обстоятельство отражают через соответствующие законы равновесия. Однако в самом общем виде сказанное можно зафиксировать следующим образом:

$$c = c^* \quad \text{при} \quad z = 0, \quad (3.4)$$

где c^* — равновесная концентрация примеси в воздухе на границе с подстилающей поверхностью.

В случае инертной поверхности следует предложить условие, отражающее то, что поток массы на подстилающую поверхность равен нулю:

$$A_z \partial c / \partial z = 0 \quad \text{при} \quad z = 0. \quad (3.5)$$

Такая ситуация реализуется, если $\partial c / \partial z = 0$, а A_z имеет конечные значения. Равенство нулю нормальной компоненты вектора

градиента концентрации означает, что подстилающая поверхность непроницаема для примеси.

Анализ решений прогностического уравнения

Первоначально предполагалось, что так же, как и D , величины A_i постоянны и не зависят от координат. При этом условии и в предположении консервативной примеси (т. е. примеси, не участвующей в реакциях, $k = 0$), Робертс (1923) описал рассеяние примеси из стационарного точечного источника, имеющего координаты $(0, 0, h)$. Решение уравнения (1.6) при этом имеет вид:

$$\begin{aligned} & [M/4\pi \times \sqrt{(A_y A_z)}] \exp(-uy^2/4A_y x) \{ \exp[-u(z-h)^2/4A_z x] + \\ & + \exp[-u(z+h)^2/4A_z x] \}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Согласно этому решению между концентрацией примеси на уровне h по направлению ветра и расстоянием до источника существует обратнопропорциональная зависимость:

$$c \sim x^{-1}. \quad (3.7)$$

В действительности, как установлено экспериментально путем натуральных испытаний, зависимость имеет более благоприятный характер:

$$c \sim x^{-1.8}. \quad (3.8)$$

Основная причина несоответствия между теорией и экспериментом состоит в принятии независимости коэффициентов турбулентной диффузии от координат. В действительности необходимо иметь в виду то обстоятельство, что величины $A_i \sim f(x, y, z)$, причем с увеличением масштабов они увеличиваются по определенному закону. Если для предсказания коэффициентов турбулентного переноса используются соотношения теории вероятности, то приходят к комбинированным моделям.

Комбинированные модели

О. Г. Сэттон (1932) использовал теорему Тэйлора о поведении частицы в изотропном турбулентном потоке и, предполагая, что разброс частиц подчиняется нормальному распределению

Гаусса, получил следующее решение для распространения примеси от стационарного точечного источника:

$$c(x, y, z) = [M/\pi u x^{2-n} s_y s_z] \exp\{-(y^2/s_y^2 x^{2-n}) + (z^2/s_z^2 x^{2-n})\}, \quad (3.9)$$

где s_y и s_z — «виртуальные коэффициенты диффузии» вдоль отмеченных осей (имеющие смысл средних); n — число от 0 до 1, зависящее от профиля скорости ветра в приземном слое.

Подход О. Г. Сэттона развивался в работах Крамера, Пасквилла, Андреева, Теворовского и др.

В 1963 г. Д. Л. Лайтман предложил описывать горизонтальную и вертикальную дисперсии различными уравнениями. Это представляется логичным в связи с неравноценностью направлений z и y с точки зрения распространения турбулентности. Было предложено описывать вертикальную составляющую дисперсии полуэмпирическим уравнением, а для горизонтальной был оставлен гауссовский вид рассеяния концентраций.

Большинство зарубежных авторов теперь используют следующую формулу для расчета рассеяния примеси из стационарного точечного источника:

$$c(x, y, z) = [M/2\pi u \sigma_y \sigma_z] \exp(-y^2/2\sigma_y^2) \{ \exp[-(x-h)^2/2\sigma_z^2] + \exp[-(x+h)^2/2\sigma_z^2] \}, \quad (3.10)$$

где σ_y^2 , σ_z^2 — горизонтальная и вертикальная составляющие дисперсии распределения примеси.

Для расчета σ_y и σ_z используют соотношения $\sigma_y = B_1 x^a$ и $\sigma_z = B_2 x^b$, где B_1 , B_2 , a и b — коэффициенты, зависящие от устойчивости атмосферы и шероховатости подстилающей поверхности (обычно определяются экспериментально и табулируются).

Некоторые замечания

1. Если рассматривать рассеяние примеси из трубы, надо иметь в виду, что так называемая эффективная высота источника, как уже говорилось, складывается из высоты трубы h и некоторой добавки — Δh . При этом величина Δh растет с увеличением сил плавучести, т. е. температуры выбросов, расхода выбрасываемых газов и с уменьшением диаметра трубы при постоянном объемном расходе газов. Наоборот, эта величина уменьшается с ростом скорости ветра и понижением слоя приподнятой инверсии.

2. При анализе решений уравнений часто получают результат, когда скорость ветра входит в знаменатель. Скажем, концентрация на какой-то высоте оказывается обратно пропорциональной скорости ветра — $c \sim u^{-1}$. В таких случаях во избежание нереального устремления $c \rightarrow \infty$ необходимо помнить об изменении самих исходных уравнений при устремлении u к нулю. Как уже говорилось, при этом необходимо сохранять члены, ответственные за нестационарность процесса или ограничиваться скоростями ветра не ниже $0,5 \text{ м с}^{-1}$, т. е. условиями, при которых пульсационные скорости становятся одного порядка с величиной u . Именно так объясняется наблюдение на графиках $c_{\text{max}} = f(u)$ максимума приземной концентрации в районе скорости ветра $u = 0,32 \text{ м/с}$ (так называемая опасная скорость ветра!).

3. В соответствии со всеми моделями между величиной мощности источника выбросов M и приземными концентрациями $c(x, y, 0)$ наблюдается прямая пропорциональность.

Выбор конкретной модели (или моделей) определяется в конечном итоге целями прогнозирования и постановкой решаемой задачи прогнозирования.

Результатами расчетов по прогнозированию являются:

1) для долгосрочного прогнозирования — получение профилей концентрации загрязняющих веществ, определение расстояний и опасных скоростей ветра, соответствующих образованию максимальных концентраций загрязняющих веществ, расчет величин предельно допустимых выбросов (ПДВ) загрязняющих веществ в атмосферу и минимальных высот источников выбросов, при которых содержание ЗВ не будет превышать допустимого значения;

2) для оперативного прогнозирования — получение регрессионных или других видов зависимостей для прогнозирования концентраций загрязняющих веществ на другие периоды времени и заданные расстояния от источников загрязнения;

3) для идентификации источников загрязнения — выявление возможных источников загрязнения атмосферного воздуха.

На первом этапе долгосрочного прогнозирования определяют влияние постоянно действующих источников загрязнения атмосферы на состояние и качество атмосферного воздуха в районе, непосредственно прилегающем к производственной площадке.

На следующем этапе долгосрочного прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха типовыми точечными источниками

для загрязняющих веществ проводится оценка границ валовых выбросов (M , г/с), приводящих к превышениям ПДК_{сс} и ПДК_{мр} в различное время года. Границы оцениваются по величине максимальной концентрации от данного источника загрязнения c_m . Полученные значения необходимо использовать для оценки последствий залповых (аварийных) выбросов и принятия оперативных решений по идентификации источников загрязнения, оперативному прогнозированию концентраций загрязняющих веществ. При этом прогнозировании проводят прогнозирование концентраций наиболее опасных загрязняющих веществ при максимально неблагоприятных метеоусловиях на расстояниях, соответствующих образованию этих концентраций (по результатам вычислительного эксперимента, полученного на этапе долгосрочного прогнозирования).

Применение статистических моделей и методов

Модели прогноза данного типа основываются на статистической обработке собранной за несколько лет информации о концентрации примесей и метеорологических параметрах.

В России в качестве показателя загрязнения воздуха обычно используются средние разовые концентрации и максимальные разовые концентрации, а также повторяемость концентраций, превышающих ПДК, в общем случае характеризующая продолжительность повышенного загрязнения воздуха.

Обычно в городе в течение дня отбирают 50–100 проб воздуха на различные ингредиенты. Для оценки состояния атмосферы по городу в целом в течение конкретного дня необходимо использовать обобщенные показатели.

Концентрация q примесей, осредненная по всему городу и по срокам наблюдения данного дня, является одним из наиболее простых показателей загрязнения воздуха какой-либо отдельной примесью. Расчет выполняется по формуле:

$$\bar{q} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{q_{срi}}, \quad (3.11)$$

где q_i — средняя за день концентрация в j -м пункте; $q_{срi}$ — среднесезонная концентрация на j -м пункте; N — число стационарных пунктов в городе.

Другим показателем может быть коэффициент при первом члене разложения результатов наблюдений за концентрациями примесей на стационарных пунктах в городе по ортогональным естественным функциям (α_1), то есть:

$$\alpha_1 = \sum_{j=1}^N \varphi_{1j} q'_j, \quad (3.12)$$

где φ_{1j} — компонент первой естественной функции, относящийся к каждому стандартному пункту; q'_j — отклонения от среднесезонной концентрации на j -м пункте; N — число пунктов в городе.

Близким по физическому смыслу к коэффициенту α_1 является параметр

$$P = m/n, \quad (3.13)$$

здесь n — общее число наблюдений за концентрацией примесей в городе в течение одного дня на всех станциях; m — количество наблюдений в течение этого дня с концентрациями q , которые превышают среднесуточную концентрацию q_c более чем в 1,5 раза.

Таким образом, параметр P характеризует часть существенно повышенных концентраций от общего числа измерений в течение дня. Параметр P может изменяться от 0 до 1, в среднем же $P \approx 0,2$. Существует тесная связь между параметром P , рассчитанным для отдельных примесей, и α_1 . Коэффициенты корреляции между ними составляют 0,85–0,94. Параметр P достаточно удовлетворительно связан и со средними по городу концентрациями.

При составлении прогнозов предпочтение отдается параметру P , который с точки зрения характеристики городского фонового загрязнения воздуха не уступает другим показателям, и в то же время в определенной степени отражает общее состояние воздушного бассейна. Удобно также и то, что параметр P легко рассчитывается, он является относительной характеристикой и не зависит от среднего уровня загрязнения воздуха, следовательно, его величина в основном определяется метеорологическими условиями, т. е. оказывается возможным использовать его для анализа значения параметра P за несколько лет, даже если в течение этого периода наблюдались изменения суммарного количества выбросов и уровня концентраций.

Для прогнозирования широко применяется известный метод **распознавания образов**. Модели распознавания применяются для сопоставления объектов или явлений со сложной структурой и могут быть применены для исследования структурных изменений, выявления циклов, учета изменения тенденций во времени, пространстве или по другому параметру.

Исследования в этом случае заключаются в разработке новых и адаптации существующих методов к задачам прогнозирования и должны включать:

- разработку моделей классификации и распознавания на основе использования теории размытых образов, логических схем распознавания и др.;
- применение схем распознавания в прогнозах с использованием регрессионных, экспертных и других методов;
- оценку возможности прогноза на основе эталонных объектов и типичных представителей классов;
- разработку способов описания классов (таксонов) для выявления динамики развития во времени, пространстве или по произвольному параметру.

В качестве предикторов (характеристик, на основе которых составляется прогноз) используют некоторые метеорологические параметры, а также параметр P (исходная величина параметра P). Сущность данного метода состоит в определении степени близости конкретной ситуации (набора предикторов) к характерным ситуациям, например, повышенного, среднего и пониженного загрязнений воздуха. Для этого все значения параметра P располагаются в порядке убывания и разбиваются.

Методы прогнозирования ситуации

Прогнозирование ситуации четко отличается от ее расчета, а существующие методы прогнозирования загрязнения отличаются прежде всего тем, что не используют математического аппарата. Их технология основывается на многолетней информации об изменениях метеорологических параметров и концентраций загрязняющих веществ. Модели прогноза не используются для составления долгосрочных прогнозов, хотя осредненные характеристики за длительный период времени принимают во внимание при составлении краткосрочного прогноза. Таким образом, прогноз — это процесс, в результате которого оценивается период времени

и значение концентрации в течение этого периода на основе метеорологических предсказаний.

Рассмотрим в качестве примера методы прогноза метеорологического потенциала загрязнения воздуха на территории. Величина его, а также общее количество и характеристики выбросов определяют уровень концентрации в городах, расположенных на этой территории. Обратимся к двум возможным способам прогноза распределения потенциала загрязнения.

Первый способ предусматривает использование для прогноза параметра P и качественных характеристик потенциала, выраженных через синоптические ситуации. Параметр P принимается в качестве показателя ежедневного потенциала загрязнения воздуха. Изменение его величины изо дня в день за счет колебаний суммарного выброса над городом можно считать весьма малым. Значение P в предшествующий день (P') принимается как характеристика исходного потенциала. Рассматриваются три вида потенциала: высокого $P \geq 0,35$; повышенного $0,35 \geq P \geq 0,2$; относительно пониженного $0,2 \geq P$. Наибольший интерес вызывает прогноз первого типа.

Для краткосрочного прогнозирования потенциала загрязнения в каком-либо географическом районе необходимо, чтобы не менее чем в трех городах рассчитывался параметр P и составлялись прогнозы фоновое содержания примесей в атмосфере. Предсказанные виды загрязнения наносятся на прогностическую карту погоды, потенциал загрязнения прогнозируется по всей территории.

Другой способ прогноза, широко применяемый в США, основан на учете устойчивости нижнего слоя атмосферы и скорости переноса воздуха. Принимается, что необходимым условием значительного скопления примесей в городском воздухе при заданных выбросах является нормирование ситуации застоя воздуха, под которой понимают сочетание устойчивой стратификации и слабого ветра, а также отсутствие осадков. На основании многолетних наблюдений формируются количественные критерии застоя, например, когда средняя скорость ветра в нижнем полуторакилометровом слое не должна превышать 10 м/с. Возможность создания опасного загрязнения воздуха рассматривается только в выделенных областях застоя.

Потенциал зависит от высоты перемешивания L и скорости среднего переноса M . Значения L рассчитываются отдельно для дневного и утреннего сроков по аэрологической диаграмме.

Средний перенос U определяется как осредненная скорость ветра в слое перемешивания, для дневного периода определяется и так называемый коэффициент $\nu = uL$ ($\text{м}^2/\text{с}$). Высокий потенциал загрязнения городского воздуха предсказывается при следующих значениях параметров: $H \leq 500$ м, $M_q \leq 4$ м/с, $\nu \leq 6000$ $\text{м}^2/\text{с}$. Прогноз высокого потенциала загрязнения воздуха составляется, когда указанные выше условия сохраняются в течение 36 часов.

Однозначно сказать, какая модель лучше, нельзя. Не существует модели универсальной, а усложнять существующие, вводя все новые факторы, влияющие на процесс распространения, можно безгранично. И в каждой практической задаче требования, ею предъявляемые, и будут определять тип используемых для решения моделей.

4. СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Стокгольмская конференция (1972) по окружающей среде положила начало созданию глобальных систем мониторинга состояния окружающей среды (ГСМОС/GEMS), включая и систему наблюдения за состоянием атмосферного воздуха. Последняя является сложной информационной системой, оперирующей данными на всех земных масштабах и уровнях, начиная с глобального уровня и кончая *импактными* уровнями.

Вообще удобно всю систему мониторинга воздушной среды представлять в виде пирамиды, на самом вершине которой проводятся фоновые измерения в самых чистых местах планеты, удаленных от территорий активной человеческой деятельности на тысячи километров (т. е. осуществляется *глобальный фоновый мониторинг*). Ниже на этой пирамиде располагается система регионального мониторинга, еще ниже — импактного. Последний термин происходит от английского слова «*impact*», которое означает непосредственное влияние (воздействие). Таким образом, системы импактного мониторинга географически размещаются в местах активной человеческой деятельности.

Система была бы неполной, если бы не включала наблюдения за *источниками выбросов* на самих предприятиях (мониторинг источников). Предполагалось, что такие наблюдения должны производиться на самих предприятиях имеющимися или создаваемыми там службами или с использованием услуг внешних организаций. В условиях отлаженной экономики и развитой нормативно-правовой базы стран с рыночной экономикой последние довольно быстро (хотя и не безболезненно) приспособились к контролю экологической обстановки фактически с двух сторон (имеется в виду сочетание контроля импактных зон и контроля на самом предприятии, которое, конечно, тоже входит в импактную зону).

Мониторинг источников на российских предприятиях также осуществляется внутренними службами. Однако делается это не повсеместно, а только на самых крупных, передовых предпри-

ятнях или предприятиях повышенной опасности. Более того, экономическая ситуация последнего времени стала главным препятствием на пути развития внутривзаводского контроля источников выбросов. В реальности указанная пирамида мониторинга воздуха в России оказалась «повисшей в воздухе». Именно поэтому в проекте единой государственной системы экологических наблюдений (ЕГСЭН) мониторингу источников отведено важное место в общей системе экологических наблюдений.

Типы источников

Промышленные источники загрязнения атмосферного воздуха подразделяются на **источники выделения** и **источники выбросов**. К первым относятся технологические устройства (аппараты, установки и т. п.), в процессе эксплуатации которых выделяются примеси. Ко вторым — трубы, вентиляционные шахты, аэрационные фанари и другие устройства, с помощью которых примесь поступает в атмосферу.

Промышленные выбросы бывают **организованными** и **неорганизованными**. Организованный промышленный выброс поступает в атмосферу через специально сооруженные газоходы, воздухоходы и трубы, что позволяет применять для очистки от загрязняющих веществ соответствующие установки. Желательно изолировать все возможные источники газовых выбросов, а собранные газы направить на соответствующие системы очистки-обезвреживания. При этом могут быть достигнуты не только природоохранные цели, но и получена определенная экономическая выгода от рекуперации ценных компонентов. К сожалению, далеко не все источники могут быть изолированы, т. е. организован целенаправленный отток газов через трубы и газоходы в очистное технологическое оборудование.

В зависимости от степени совершенства производства организованные источники по мощности составляют от нуля (несовершенное производство) до почти 100 % (совершенное производство). Для российских предприятий эта цифра в среднем приблизительно равна 30 %. Оставшиеся 70 % газовых выбросов рассеиваются через окна, фанари и другие цеховые негерметичности.

Неорганизованный промышленный выброс поступает в атмосферу в виде ненаправленных потоков газа в результате нару-

шений герметичности оборудования, отсутствия или неудовлетворительной работы установок отсоса газа в местах загрузки, выгрузки или хранения продукта. Неорганизованные выбросы характерны для очистных сооружений, хвостохранилищ, золоотвалов, участков погрузочно-разгрузочных работ, сливно-наливных эстакад, резервуаров и других объектов.

В зависимости от геометрических особенностей источники подразделяют на **точечные**, **линейные** и **площадные**. Условность этих понятий очевидна. Город (в качестве источника загрязнения атмосферы) может рассматриваться как точка (на карте). В то же время его нельзя принимать за точку при описании распространения загрязняющих веществ на расстояния порядка диаметра самого города. В этом случае город — площадной источник. Пример линейного источника — автотрасса. Введенные понятия важны при моделировании процессов распространения примесей в атмосфере.

Типы загрязняющих веществ

Одновременно с характером источников важно учитывать степень консервативности ЗВ. Примесь считается полностью **консервативной**, если мощность физико-химического стока равна нулю (см. уравнение (2.6)). Это возможно, если константа скорости k в уравнении (2.6) равна нулю. Другими словами, рассеиваемое в пространстве вещество не реагирует, не поглощается каплями дождя, не подвергается фотохимическим превращениям, не адсорбируется почвой и т. п. Такие вещества имеют очень большое время жизни в атмосфере и потому переносятся на большие расстояния воздушными потоками без изменения. Считают, что, если время жизни загрязняющего вещества превышает 1 год, то его можно отнести к глобальным. Глобальные ЗВ, будучи выброшенными в одном месте, через год настолько хорошо перемешиваются в атмосфере, что их концентрация становится практически одинаковой во всем приземном слое. Примером **глобальных загрязняющих веществ** (ГЗВ) могут служить CO_2 , фреоны и суперэкоотоксиканты типа диоксинов, дибензофуранов и ПХБ. ГЗВ создают проблемы планетарного масштаба.

Региональные ЗВ обладают или меньшим временем жизни, или выбрасываются в количестве, которое значимо только в пре-

делах региона, а не всей планеты. Они возникают как результат региональной деятельности человека и создают проблемы регионального же уровня.

Локальные ЗВ обладают или еще меньшим временем жизни, или их количество так мало, что не следует учитывать воздействие таких ЗВ на региональном уровне. Воздействие этих ЗВ значимо только в данном месте. В подавляющем большинстве случаев местным комитетам по охране окружающей среды приходится иметь дело с локальными ЗВ.

Неконсервативные ЗВ, претерпевая физико-химические превращения, трансформируются в иные вещества и продукты, которые могут оказаться как менее, так и более токсичными, чем исходные (**первичные ЗВ**). **Вторичные** вещества и продукты, обладая иными свойствами, нежели первичные, находят свои геофизические и биологические барьеры, которые задерживают их перемещение в пространстве. Для организации мониторинга (особенно комплексного, когда наблюдения ведутся по всем средам, включая и биотическую) очень важно обнаружить эти барьеры, ибо ЗВ накапливаются именно на них и в их ближайших окрестностях. Такая идеология делает мониторинг гораздо более дешевым, поскольку открывает способ, не требующий подробного наблюдения за загрязненностью сред в пространстве и во времени.

Известно, что эффективный перенос ЗВ на большие расстояния в пространстве осуществляется главным образом по воздуху даже тех веществ, которые имеют очень малые парциальные давления своих паров (например, ПХБ, диоксины). Однако в этом случае перенос осуществляется в адсорбированном на аэрозольных частицах состоянии, а депонирующими элементами экосистем становятся барьеры (почвы, донные отложения, места скопления мортмассы животных и растительных организмов и т. д.)

Далеко не все ЗВ следует рассматривать в качестве объектов наблюдений в различных программах мониторинга, а лишь приоритетные. Это вызвано, прежде всего, сильно различающимся воздействием ЗВ на здоровье человека. Поскольку программы мониторинга, о которых идет речь в данном пособии, направлены именно на сохранение здоровья человека (гомоцентрическая концепция мониторинга), главным при определении приоритетности являются санитарно-гигиенические аспекты. Вообще же методология выбора приоритетных веществ продемонстрирована группой экспертов, готовивших решения вышеназванной Сток-

гольмской конференции. Согласно этой методологии определяющими факторами при выборе приоритетности веществ являются следующие:

- размер фактического или потенциально возможного воздействия на здоровье человека, на климат и на экосистемы;
- склонность ЗВ к деградации или накоплению в тканях человека и элементах его трофических цепей;
- возможность трансформации ЗВ в различных средах и системах, а также возможность образования вторичных ЗВ более токсичных или более склонных к накоплению в тканях человека;
- мобильность ЗВ;
- фактические или возможные тренды концентраций ЗВ в окружающей среде;
- частота воздействия;
- возможность наблюдения за ЗВ.

Особенности мониторинговых программ

Рассмотрим системный подход к анализу данных наблюдений в различных программах мониторинга и выявим, как влияет фактор географического масштаба наблюдений на исполнение той или иной программы.

Мониторинг источников

Состав газовых выбросов в источнике полностью определяется в качественном и количественном отношении технологией и ее совершенством. Уровни концентраций ЗВ в источнике превышают ПДК_{сс} в десятки тысяч раз. Аналитическая задача не сложна, поскольку состав известен и достаточно стабилен, а уровни концентраций высоки и не требуют предварительного концентрирования пробы. Все трудности связаны с взятием представительной пробы из источника, поскольку газовые потоки часто гетерогенны, нагреты до высокой температуры и неоднородны по времени и диаметру газотока. Здесь перспективны неконтактные методы анализа, не требующие взятия проб. Данный уровень мониторинга в этом пособии не рассматривается.

Импактный мониторинг

Состав и уровни концентраций в значительной мере (но не полностью) определяются технологиями производств, создающих загрязнение. В данном случае физико-химические процессы в окружающей среде и метеорологические условия начинают играть существенную роль в создании наблюдаемых уровней концентраций ЗВ. Последние иногда превышают ПДК_{сс} в десятки раз. Наблюдается тесная связь между расположением источников, их характеристиками, направлением и скоростью ветра и полями концентраций ЗВ. Наблюдения осуществляются на стационарных, передвижных и подфакельных постах.

Стационарные посты оборудованы метеорологической аппаратурой и приборами для контроля за 3—4 приоритетными веществами.

Передвижные посты — передвижные лаборатории, служащие для уточнения мест расположения стационарных постов. Такое уточнение требуется в связи с динамичностью хозяйственной деятельности и изменениями характера застройки.

Подфакельные посты следят за распространением выбросов из заводских труб, сообщая о случаях критических ситуаций, особенно в условиях неблагоприятных метеорологических условий. Эти службы также снабжены передвижными лабораториями.

Региональный мониторинг

Значительное удаление от предприятий приводит к тому, что уровни концентраций ЗВ оказываются ближе к фоновым, обычно в пределах ПДК_{сс} или даже ниже. Аналитическая задача усложняется не только из-за необходимости предварительного концентрирования примесей, но и сильной вариабельности их величин и качественного состава. Мониторинг в этом случае относится к аэроаналитическим задачам, в которых роль воздушных течений исключительно велика. Необходим учет всей региональной деятельности, включая и сельскохозяйственную, при этом прямую связь между загрязнением атмосферы и конкретными технологиями установить нелегко. Обычно приходится иметь дело с целым рядом вторичных веществ, возникших в результате фотохимических и биологических процессов.

Региональный мониторинг дает возможность стыковать данные импактного и глобального фонового мониторинга, а также позволяет выявить основные пути распространения ЗВ на большие расстояния. Непосредственные сведения о состоянии загрязнения атмосферы на региональном уровне могут быть получены по данным наблюдений в небольших населенных пунктах, расположенных вдали от крупных городов, при условии, что источники загрязнения воздуха в этих пунктах отсутствуют. Сведения о региональном фоновом загрязнении атмосферы получают также из данных сети постов наблюдений за трансграничным переносом загрязняющих веществ.

Косвенным показателем состояния загрязнения атмосферы могут служить данные о химическом составе проб атмосферных осадков и снежного покрова. Эти данные характеризуют загрязнение слоя атмосферы, в котором образуются облака, происходит газовый обмен и из которого выпадают осадки и сухие вещества в их отсутствие.

Данные о содержании веществ в снежном покрове являются важнейшим материалом для оценки регионального загрязнения атмосферы в зимний период на больших территориях страны и выявления ареала распространения загрязняющих веществ от промышленных центров и городов. Химический анализ содержания вредных веществ осуществляется методами, используемыми при исследовании проб либо атмосферных осадков, либо воздуха.

Подробнее импактный и региональный мониторинг будут рассмотрены в системе ОГСНКа.

Фоновый мониторинг

Рост выбросов вредных веществ в атмосферу в результате индустриализации и урбанизации вызывает увеличение содержания примесей на значительном расстоянии от источников загрязнения и глобальные изменения в составе атмосферы, что, в свою очередь, может привести к многим нежелательным последствиям, в том числе и к изменению климата. В связи с этим необходимо определять и постоянно контролировать уровень загрязнения атмосферы далеко за пределами зоны непосредственного действия промышленных источников и его дальнейшее изменение.

Всемирной метеорологической организацией (ВМО) в шестидесятых годах XX века была создана мировая сеть станций мониторинга фоновых загрязнений атмосферы (БАПМОН). Ее цель состояла в получении информации о фоновых уровнях концентрации атмосферных составляющих, их вариациях и долгопериодных изменениях, по которым можно судить о влиянии человеческой деятельности на состояние атмосферы.

Нарастающая острота проблемы загрязнения окружающей среды в глобальном масштабе привела к созданию в семидесятые годы XX века Комитета ООН по окружающей среде (UNEP), которым было принято решение о создании Глобальной системы мониторинга окружающей среды (ГСМОС), предназначенной для наблюдения за фоновым состоянием биосферы в целом и, в первую очередь, за процессами ее загрязнения.

Станции мониторинга фоновых загрязнений атмосферы (станции БАПМОН) ответственны за проведение наблюдений и своевременную отправку полученных первичных данных в курирующие их управления по гидрометеорологии (УГМ) и Главную геофизическую обсерваторию (ГГО) им. А. И. Воейкова.

На УГМ возлагается решение задач обеспечения и контроля работы фоновых станций, а также внедрения на них предлагаемых для сети новых методов контроля фоновых состояний атмосферы. ГГО является национальным научно-методическим центром работ по фоновому мониторингу атмосферы в рамках программы БАПМОН.

Размещение фоновых станций

Как правило, фоновые наблюдения по специальной программе фоновых экологического мониторинга проводятся в биосферных заповедниках и на заповедных территориях. Ранее биосферные заповедники были расположены по всей территории СССР. В них осуществляются оценка и прогнозирование загрязнения атмосферного воздуха путем анализа содержания в нем взвешенных частиц, свинца, кадмия, мышьяка, ртути, бенз(а)пирена, сульфатов, диоксида серы, оксида азота, диоксида углерода, озона, ДДТ и других хлорорганических соединений. Программа фоновых экологического мониторинга включает также определение фоновых уровней загрязняющих веществ ан-

тропогенного происхождения во всех средах, включая биоты. Помимо измерения состояния загрязнения атмосферного воздуха, на фоновых станциях производятся также метеорологические измерения.

Информация, получаемая с фоновых станций, позволяет оценивать состояние и тенденции глобальных изменений загрязнения атмосферного воздуха. Фоновые наблюдения проводятся также с помощью научно-исследовательских судов в морях и океанах.

Считается, что для всей Земли достаточно 30—40 базовых станций на суше и до 10 — на акватории мирового океана. Число региональных станций и их расположение должны обеспечивать достаточно быстрое выявление всех негативных тенденций в данном регионе.

При организации станций комплексного фоновых мониторинга (СКФМ) обращают внимание на то, что их местоположение по своим ландшафтным и климатическим характеристикам должно быть репрезентативным для данного региона. Оценка репрезентативности начинается с анализа климатических, топографических, почвенных, ботанических, геологических и других материалов.

После выбора района необходимо учесть имеющиеся на данной территории источники загрязнения. При наличии крупных локальных источников (административно-промышленных центров с населением более 500 тыс. человек) расстояние до наблюдательного полигона СКФМ должно составлять не менее 100 км. Если это выполнить невозможно, то следует расположить СКФМ таким образом, чтобы повторяемость воздушного потока, обуславливающего перенос загрязняющих веществ от источника в направлении станции, не превышала 20—30 %.

СКФМ включает *стационарный наблюдательный полигон* и *химическую лабораторию*. Наблюдательный полигон составляют пробоотборные площадки, гидропосты и в ряде случаев наблюдательные скважины. Здесь полигоне выполняется отбор проб атмосферного воздуха и атмосферных осадков, вод, почв, растительности, а также проводятся гидрометеорологические и геофизические измерения.

Площадка размером 50 × 50 м, на которой размещаются пробоотборные установки и измерительные приборы, называется *опорной (базовой) площадкой* фоновой станции. Она должна находиться на ровном участке ландшафта с малой степенью закрыто-

сти горизонта, вдали от стросний, лесных полос, холмов и других препятствий, способствующих возникновению локальных орографических возмущений, т. е. особенностей рельефа местности. Площадку оборудуют установками для отбора проб воздуха, осадкосборниками, газоанализаторами, типовым комплектом метеорологических приборов.

Химическая лаборатория станции располагается на расстоянии не ближе 500 м от опорной площадки, в ней проводятся обработка и анализ той части проб, которая не подлежит пересылке в региональную лабораторию: содержание в атмосферном воздухе взвешенных частиц (пыли), сульфатов и диоксида серы; измерение рН, электропроводности, концентрации анионов и катионов в атмосферных выпадениях.

Станции БАПМоН — фоновые станции — подразделяются на три категории: базовые, региональные и континентальные.

Базовые станции следует располагать в наиболее чистых местах, в горах, на изолированных островах. Основной их задачей является наблюдение за глобальным фоновым уровнем загрязнения атмосферы, не испытывающим влияния никаких локальных источников.

Региональные станции должны находиться в сельской местности, не менее чем в 40 км от крупных источников загрязнения. Их цель — обнаружение в районе станции долгопериодных колебаний атмосферных составляющих, обусловленных изменениями в использовании земли и другими антропогенными воздействиями.

Континентальные станции охватывают более широкий спектр исследований по сравнению с региональными станциями. Они должны размещаться в отдаленных районах, чтобы в радиусе 100 км не было источников, которые могли бы повлиять на локальные уровни загрязнения.

Программы наблюдения на станциях

На станциях **КФМ** реализуется один из принципов фонового мониторинга — комплексное изучение содержания загрязняющих веществ в компонентах экосистем. В связи с этим программа наблюдений на данных станциях включает систематические измерения содержания загрязняющих веществ одновременно во

всех средах (табл. 4.1), дополненные гидрометеорологическими данными.

Таблица 4.1. Список компонентов, подлежащих контролю на СКФМ

Компонент	Окружающая среда				
	атмосфера	атмосферные выпадения	поверхностные и подземные воды	почва	биота
Пыль	+	—	—	—	—
Диоксид серы	+	—	—	—	—
Озон	+	—	—	—	—
Оксид углерода	+	—	—	—	—
Диоксид углерода	+	—	—	—	—
Углеводороды	+	—	—	—	—
3,4-бенз(а)пирен	+	+	+	+	+
Хлорорганические соединения	+	+	+	+	+
Хлорфторуглеводороды	+	—	—	—	—
N,P-содерж. вещества	—	+	+	+	+
Анионы и катионы	—	+	—	—	—
Радионуклиды	—	+	—	—	—
Тяжелые металлы	+	+	—	—	—

Перечень включенных в программу веществ составлен с учетом таких их свойств, как распространенность и устойчивость в окружающей среде, способность к миграции на большие расстояния, степень негативного воздействия на биологические и геофизические системы различных уровней.

В *атмосферном воздухе* подлежат измерению среднесуточные концентрации: взвешенных веществ, озона, оксидов углерода и азота, диоксида серы, сульфатов, 3,4-бенз(а)пирена, ДДТ и других хлорорганических соединений, свинца, кадмия, ртути, мышьяка, показателя аэрозольной мутности атмосферы.

В *атмосферных осадках* подлежат измерению в суммарных месячных пробах концентрации: свинца, ртути, кадмия, мышья-

ка, 3,4-бенз(а)пирена, ДДТ и других хлорорганических соединений, рН, анионов и катионов.

Метеорологические наблюдения включают наблюдения за температурой и влажностью воздуха, скоростью и направлением ветра, атмосферным давлением, облачностью (количеством, формой, высотой), солнечным сиянием, атмосферными явлениями (туман, метели, грозы, пыльные бури, и т. п.), атмосферными осадками (количеством и интенсивностью), снежным покровом (высотой, содержанием влаги), температурой почвы (на поверхности и в глубине), состоянием поверхности почвы, радиацией (прямой, рассеянной, суммарной и отраженной) и радиационным балансом, градиентами температуры, влажности и скорости ветра на высоте 0,5–10 м, градиентами температуры, влажности почвы на глубине 0–20 см, тепловым балансом.

В обязательную программу наблюдений на базовых станциях БАПМоН включены наблюдения за содержанием диоксида серы, аэрозольной мутностью атмосферы, радиацией, взвешенными аэрозольными частицами, химическим составом осадков.

На региональных станциях программа наблюдений включает измерение атмосферной мутности, концентрации взвешенных аэрозольных частиц, определение химического состава атмосферных осадков.

Программа наблюдений на фоновых станциях разных категорий может быть расширена за счет увеличения числа определяемых в атмосфере газов, в частности, малых газовых компонентов, объемная концентрация которых менее 1 % и которые, преобразуясь в атмосфере, могут превратиться в аэрозольные частицы.

Любые наблюдения по программе фонового мониторинга должны сопровождаться комплексом *обязательных метеорологических наблюдений*, а именно, видимости, атмосферных явлений, температуры и влажности воздуха, направления и скорости ветра, атмосферного давления. Поэтому фоновые наблюдения желательно проводить на базе метеорологических станций.

По мнению экспертов ООН, первые пять загрязняющих атмосферу веществ, подлежащих контролю, располагаются в следующем порядке: SO₂, Оз, NO_x, Pb, CO₂ (табл. 4.2). Необходимо отметить, что поступление этих веществ в приземный слой атмосферы в результате антропогенной деятельности сравнимо с естественным поступлением.

Таблица 4.2. Классификация загрязняющих веществ по их приоритетности

Класс приоритетности	Примесь	Среда	Тип программы
1	SO ₂ и взвешенные частицы Радионуклиды (Sr ⁹⁰ , Cs ¹³⁷)	Воздух Пища	И Р Ф И Р
2	Озон Хлорорганические соединения и диоксины Кадмий	Воздух Биота, человек Биота, человек	И (тропосфера) Ф (стратосфера) И Р И Р
3	Нитраты, нитриты Оксиды азота	Вода, пища Воздух	И И
4	Ртуть Свинец Диоксид углерода	Пища, вода Воздух, пища Воздух	И Р И Ф
5	Оксид углерода Углеводороды нефти	Воздух Морская вода	И Р Ф
6	Фториды	Пресная вода	И
7	Асбест Мышьяк	Воздух Питьевая вода	И И
8	Микротоксины Микробиологические загрязнения Реакционноспособные загрязнения	Пища Пища Воздух	И Р И Р И

Государственная система наблюдения и контроля атмосферного воздуха (ГСНК (А))

ГСНК(А) — составная часть Государственной системы наблюдений и контроля (ГСНК) за состоянием природной среды. Основные задачи ГСНК(А) такие же, как у всей системы ГСНК:

1. Наблюдение и контроль за уровнем загрязнения окружающей среды по физическим, химическим и гидробиологическим (для водной среды) характеристикам с целью выявления оценки уровня загрязненности и его изменений в пространстве и времени, выявления источников загрязнения, а также оценки эффективности мероприятий по защите от загрязнения.

2. Обеспечение заинтересованных организаций и учреждений оперативной и режимной информацией об изменениях уровня загрязнения объектов окружающей среды и о возможности их изменения под влиянием хозяйственной деятельности и гидрометеорологических условий, а также обеспечение прогнозами о возможных изменениях уровня загрязненности любых сред.

Основные принципы организации ГСНК(А):

1. *Комплексность*, предусматривающая согласованную программу всех работ с различными объектами и природными средами.

2. *Синхронность* всех систем наблюдений и согласованность сроков проведения наблюдений по сезонам и в связи с характерными гидро- и метеорологическими условиями.

Как видно, служба ГСНК(А) взяла многое из рекомендаций, на которых основана ГСМОС.

ГСНК(А) состоит из двух уровней мониторинга:

- импактный мониторинг;
- региональный мониторинг, включая фоновый.

Сеть ГСНК(А) начала создаваться в 1964 г. и на территории бывшего СССР к концу 1991 г. охватывала более 350 городов и промышленных центров. Почти на 1200 постоянно действующих постах регулярно измерялись содержание в воздухе около 80 видов примесей и метеорологические характеристики. В настоящее время на территории России регулярные наблюдения проводятся почти на 750 постах примерно в 250 городах. Наблюдениями охвачено до $\frac{2}{3}$ городского населения. Число стационарных постов определяется в зависимости от численности населения в городе, площади населенного пункта, рельефа местности и степени индустриализации.

Так, в зависимости от численности населения устанавливается:

- 1 пост — до 50 тыс. жителей;
- 2 поста — 50—100 тыс. жителей;
- 2—3 поста — 100—200 тыс. жителей;
- 3—5 постов — 200—500 тыс. жителей;
- 5—10 постов — более 500 тыс. жителей;
- 10—20 постов (стационарных и маршрутных) — более 1 млн жителей.

В основу системы наблюдений положены: регулярность, единство программы наблюдений, репрезентативность положения стационарного поста. Обработка данных производится в

ГГО им. А. И. Воейкова в Санкт-Петербурге. Обычно на каждом посту измеряется до восьми загрязняющих веществ, но, учитывая, что каждый промышленный центр имеет свою экологическую специфику и набор ЗВ, возможно измерение до 80 компонентов.

Прерогатива контроля источников загрязнения (выбросов, труб и т. п.) принадлежит отделам охраны окружающей среды самих предприятий в контакте с санитарно-гигиеническими службами. Остальные три уровня контроля выполняются службами, институтами и учреждениями Роскомгидромета.

Организация наблюдений за загрязнением атмосферы

Необходимость организации контроля загрязнения атмосферного воздуха в зоне интенсивного антропогенного воздействия определяется предварительными экспериментальными (в течение 1—2 лет) и теоретическими исследованиями с использованием методов математического и физического моделирования. Такой подход позволяет оценить степень загрязнения той или иной примесью атмосферного воздуха в городе или любом другом населенном пункте, где имеются стационарные и передвижные источники выбросов вредных веществ.

Для получения репрезентативной информации о пространственной и временной изменчивости загрязнения воздуха нужно предварительно провести обследование метеорологических условий и характера пространственной и временной изменчивости загрязнения воздуха с помощью передвижных средств. Для этого чаще всего используют передвижную лабораторию, производящую отбор, а иногда и анализ проб воздуха во время остановок. Такой метод обследования называется рекогносцировочным. Он находит достаточно широкое применение за рубежом.

На карту-схему города (населенного пункта, района) наносится регулярная сетка с шагом 0,1; 0,5 или 1,0 км. На местности по специально разработанной программе случайного отбора проб отбираются и анализируются пробы в точках, совпадающих с узлами сетки, наложенной на карту-схему. Для получения статистически достоверных средних значений измеренных концентраций проводится анализ комбинаций точек на сетке, объединенных в квадраты, например, площадью (2—4) км², с учетом направлений ветра. Такой метод позволяет выявить как границы

промышленных комплексов и узлов, так и зоны их влияния. При этом обеспечивается возможность сравнения полученных результатов с расчетными данными математических моделей. Использование методов моделирования в этих работах является обязательным.

Правила организации наблюдений за уровнем загрязнения атмосферы в городах и населенных пунктах установлены в ГОСТ 17.2.3.01—86 «Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов». Наблюдения за уровнем загрязнения атмосферы осуществляют на постах. Постом наблюдения является выбранное место (точка местности), на котором размещают павильон или автомобиль, оборудованные соответствующими приборами.

Устанавливаются посты наблюдений трех категорий:

- стационарные;
- маршрутные;
- передвижные (подфакельные).

Стационарный пост служит для обеспечения непрерывной регистрации содержания загрязняющих веществ или регулярного отбора проб воздуха для последующего анализа.

Маршрутный пост предназначен для регулярного отбора проб воздуха, когда невозможно или нецелесообразно установить стационарный пост или необходимо более детально изучить состояние загрязнения воздуха в отдельных районах.

Передвижной (подфакельный) пост занимается отбором проб под дымовым (газовым) факелом с целью выявления зоны влияния данного источника промышленных выбросов.

При размещении постов наблюдений предпочтение отдается районам жилой застройки с наибольшей плотностью населения, где возможны случаи превышения установленных пороговых значений гигиенических показателей ПДК. Наблюдения должны проводиться за всеми примесями, уровни которых превышают ПДК.

Помимо наблюдений в городах, ведутся наблюдения за пределами урбанизированных территорий, в том числе и в заповедниках, которые позволяют оценить фоновое загрязнение, возникающее в результате переноса поллютантов атмосферными потоками, а по отдельным станциям — естественное фоновое содержание веществ в атмосфере.

На рис. 4.1 представлены зоны загрязнения атмосферного воздуха вокруг промышленного узла.

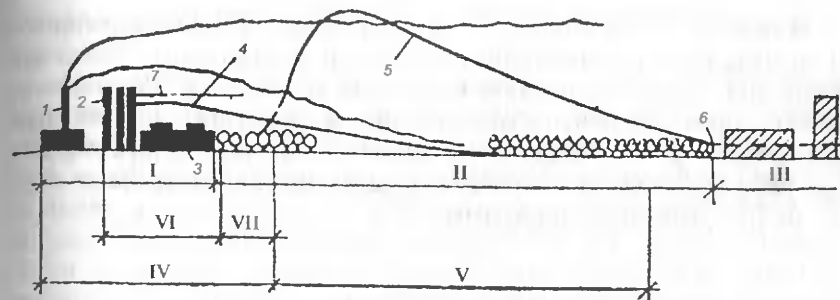


Рис. 4.1. Зоны загрязнения атмосферного воздуха вокруг промышленного узла: в санитарно-защитной зоне: I — промышленная площадка; II — санитарно-защитная зона; III — жилой район; IV — зона переброса факела загрязненного воздуха из высоких источников; V — зона наибольшего загрязнения от выбросов через высокие трубы; VI — зона загрязнения от низких, затененных источников; VII — наиболее благоприятный участок для застройки; 1 — высокие выбросы (трубы); 2 — открыто расположенное технологическое оборудование; 3 — низкие затененные выбросы; 4 — максимальные концентрации вредных веществ от низких выбросов; 5 — максимальные концентрации вредных веществ от высоких выбросов; 6 — ПДК населенных мест; 7 — ПДК для промплощадки, которую рекомендуется принимать 0,3 ПДК р.з.

Регулярные наблюдения на стационарных постах проводятся по одной из четырех программ наблюдений:

- полной (П) — предназначенной для получения информации о разовых и среднесуточных концентрациях, наблюдения выполняются непрерывно (автоматическими устройствами) или дискретно не менее четырех раз при обязательном отборе в 1, 7, 13, 19 ч;
- неполной (НП) — с целью получения информации о разовых концентрациях ежедневно в 7, 13, 19 ч;
- сокращенной (СС) — для получения сведений только о разовых концентрациях ежедневно в 7 и 13 ч;
- суточной (С) — для получения информации о среднесуточной концентрации, проводится путем непрерывного суточного отбора проб и не позволяет получать разовые значения концентраций.

Одновременно с отбором проб воздуха определяют следующие метеорологические параметры:

- направление и скорость ветра;
- температуру воздуха;
- состояние погоды и подстилающей поверхности.

В период неблагоприятных метеоусловий, сопровождающихся значительным возрастанием примесей до высокого уровня загрязнения, проводят наблюдения через каждые 3 ч. Реальность, однако, может вносить существенные коррективы: ненадежная работа приборов и нерадивость персонала, а также многочисленные реорганизации и сокращения сотрудников фактически сводят на нет указанные программы.

Перечень веществ, подлежащих контролю

Обязательно измеряют основные, наиболее часто встречающиеся загрязняющие воздух вещества: пыль, диоксид серы, оксид углерода, оксиды азота.

Выбор других веществ, требующих контроля, определяется спецификой производства и выбросов в данной местности, частотой превышения ПДК на основе сведений о составе и характере выбросов от источников загрязнения и метеорологических условиях рассеивания примесей. Определяются вещества, которые выбрасываются предприятиями города, и оценивается возможность превышения ПДК этих веществ. Принцип выбора вредных веществ и составления списка приоритетных веществ основан на использовании параметра потребления воздуха (ПВ):

реального

$$ПВ_i = M_i/q_i \quad (4.1)$$

и требуемого

$$ПВ_{тj} = M_j/ПДК_j, \quad (4.2)$$

где M_i — суммарное количество выбросов i -й примеси от всех источников; q_i — концентрация, установленная по данным расчетов или наблюдений.

Если $ПВ_{тj} > ПВ_i$, то ожидаемая концентрация примеси в воздухе может быть равна ПДК или превысить ее. Следовательно, данная примесь должна контролироваться. Перечень веществ для организации наблюдений устанавливается сравнением ПВ с $ПВ_t$ для средних ($ПВ_{cc}$) и максимальных ($ПВ_{мр}$) концентраций примесей.

Для выявления необходимости наблюдений за i -й примесью с использованием $ПВ_{cc}$ предлагается графический метод — рассматривается семейство линий по заданным значениями потен-

циала загрязнения атмосферы (ПЗА) и характерного размера города (L).

После выбора основных примесей, подлежащих контролю, определяется очередность организации контроля за специфическими примесями, выбрасываемыми разными источниками. Первой в список контролируемых примесей войдет имеющая наибольшее значение $ПВ_t$, второй — со следующим значением $ПВ_t$ и т. д. Так составляют первый предварительный список примесей. Если несколько примесей имеют одинаковые значения $ПВ_t$, то сначала записывается та, которая относится к классу опасности 1, затем 2, 3 и 4.

На основании установленного перечня веществ в каждом городе определяют вещества для организации наблюдений на постах. На опорных стационарных постах организуются наблюдения за содержанием основных ЗВ:

- пыли;
- диоксида серы;
- оксида углерода;
- оксида и диоксида азота;
- специфическими веществами, которые характерны для промышленных выбросов предприятий данного города.

Кроме веществ, приоритет которых установлен по изложенной методике, в **обязательный перечень контролируемых веществ** в городе включают:

- растворимые сульфаты — в городах с населением более 100 тыс. чел.;
- формальдегид и соединения свинца — в городах с населением более 500 тыс. чел.;
- металлы — в городах с предприятиями черной и цветной металлургии;
- бенз(а)пирен — в городах с населением более 100 тыс. чел. и в населенных пунктах с крупными источниками выбросов;
- пестициды — в городах, расположенных вблизи крупных сельскохозяйственных территорий, на которых используются пестициды.

Выбросы перечисленных веществ трудно точно установить, и их приоритет не может быть определен по изложенной методике.

Перечень вредных веществ, подлежащих контролю, пересматривается при изменении данных инвентаризации промышленных выбросов, появлении новых источников выбросов, но не реже одного раза в три года.

Расширение перечня контролируемых веществ осуществляется после предварительных наблюдений, направленных на ориентировочную оценку состояния загрязнения. Такие наблюдения могут проводиться на стационарных, маршрутных постах или при эпизодических обследованиях.

Стационарные и передвижные посты наблюдения

Стационарный пост наблюдений — это специально оборудованный павильон, в котором размещена аппаратура, необходимая для регистрации концентраций загрязняющих веществ и метеорологических параметров по установленной программе. В числе стационарных постов выделяются опорные стационарные посты, которые предназначены для выявления долговременных изменений содержания основных или наиболее распространенных загрязняющих веществ. Место для установки стационарного поста выбирается, как правило, с учетом метеорологических условий формирования уровней загрязнения атмосферного воздуха. При этом заранее определяется круг задач: оценка средней месячной, сезонной, годовой и максимальной разовой концентраций, вероятности возникновения концентраций, превышающих ПДК, и др.

Перед установкой поста следует проанализировать:

- расчетные поля концентраций по всем ингредиентам от совокупности выбросов всех стационарных и передвижных источников;
- особенности застройки и рельефа местности: перспективы развития жилой застройки и расширения предприятий промышленности, энергетики, коммунального хозяйства;
- транспорта и других отраслей городского хозяйства;
- функциональные особенности выбранной зоны;
- плотность населения;
- метеорологические условия данной местности и др.

Пост должен находиться вне аэродинамической тени зданий и зоны зеленых насаждений, его территория должна хорошо проветриваться, не подвергаться влиянию близкорасположенных низких источников (стоянок автомашин, мелких предприятий с низкими выбросами т. п.). Количество стационарных постов в каком-либо городе (населенном пункте) определяется численностью населения, рельефом местности, особенностями промыш-

ленности, функциональной структурой (жилая, промышленная, зеленая зона и т. д.), пространственной и временной изменчивостью полей концентраций вредных веществ.

Для населенных пунктов со сложным рельефом и большим числом источников рекомендуется устанавливать один пост на каждые (5—10) км². Чтобы информация о загрязнении воздуха учитывала особенности города, рекомендуется ставить посты наблюдений в различных функциональных зонах — жилой, промышленной и зоны отдыха. В городах с большой интенсивностью движения автотранспорта посты устанавливают также и вблизи автомагистралей.

Для обеспечения оптимальных условий проведения стационарных наблюдений отечественная промышленность выпускает стандартные павильоны-посты наблюдений или комплектные лаборатории типа ПОСТ.

Стационарный пост наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха «ПОСТ-1» — утепленный, обитый дюралевыми ячеями павильон, в котором установлены комплекты приборов и оборудования для отбора проб воздуха, проведения метеорологических измерений: скорости и направления ветра, температуры, влажности. Практически все стационарные пункты контроля загрязнения оборудованы комплектными лабораториями ПОСТ-1. Их оборудование включает: автоматические газоанализаторы ГМК-3 (на оксид углерода) и ГКП-1 (на диоксид серы), системы для проведения отбора проб и метеорологических наблюдений, мачту для установки датчика ветра, систему электроснабжения и освещения.

Выпускаются и устанавливаются более новые модификации лаборатории — ПОСТ-2 и ПОСТ-2а, которые отличаются более высокой производительностью отбора проб и степенью автоматизации.

Стационарный пост наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха «ПОСТ-2» предназначен для отбора проб атмосферного воздуха на газовые примеси и взвешенные вещества для дальнейшего анализа в химической лаборатории; для измерения метеорологических параметров атмосферы — скорости и направления ветра, температуры и относительной влажности воздуха, атмосферного давления. Отличается от «ПОСТ-1» наличием дополнительного оборудования: автоматического воздухоотборника «Компонент» и электроасpirатора ЭА-2С. Для измерения метео-

рологических элементов в лаборатории используют автоматический метеокомплекс (рис. 4.2).

Станция автоматического контроля воздуха МР-16 предназначена для измерения разовых концентраций ЗВ в атмосфере, контроля основных метеорологических параметров, передачи полученных данных в центр сбора и обработки информации. Станция позволяет проводить непрерывное автоматическое измерение концентраций ЗВ: CO , SO_2 , NO_2 , NO_x , NH_3 , H_2S , Cl_2 , ΣCH . В случаях превышения ПДК передача информации в центр происходит в инициативном порядке. Пробоотборный зонд с газовой магистралью осуществляет отбор проб по пяти независимым каналам, контроль и автоматическое управление подогревом пробы (рис. 4.3).



Рис. 4.2. Вид павильона «ПОСТ-2»



Рис. 4.3. Вид станции МР-16

Маршрутный пост наблюдений — место на определенном маршруте в городе. Он предназначен для регулярного отбора проб воздуха в фиксированной точке местности при наблюдениях, которые проводятся с помощью передвижной аппаратуры. Маршрутные наблюдения осуществляются на маршрутных постах с помощью автолабораторий. Такая передвижная лаборатория имеет производительность около 5000 отборов проб в год, в день можно произвести отбор 8—10 проб воздуха. Порядок объезда маршрутных постов ежемесячно меняется таким образом, чтобы отбор проб воздуха на каждом пункте проводился в раз-

нос время суток. Например, в первый месяц машина объезжает посты в порядке возрастания номеров, во втором — в порядке их убывания, а в третий — с середины маршрута к концу и от начала к середине и т. д.

Передвижная лаборатория «АТМОСФЕРА-2» предназначена для осуществления контроля за загрязнением воздуха, измерения метеорологических параметров: атмосферного давления, скорости и направления ветра, температуры и относительной влажности воздуха, а также экспрессной оценки загрязнения воды и почвы. Оборудование лаборатории смонтировано на кузове автофургона. В ней используются полуавтоматические переносные приборы-индикаторы, предназначенные для полуколичественного определения содержания SO_2 , H_2S , Cl_2 и O_3 в атмосферном воздухе, а также газоанализаторы серии «Элан» для количественного определения CO , SO_2 , NO_2 , O_2 , H_2S , NO , NH_3 , Cl_2 .

Передвижной (подфакельный) пост предназначен для отбора проб под дымовым (газовым) факелом с целью выявления зоны влияния данного источника. Подфакельные наблюдения за специфическими загрязняющими веществами, характерными для выбросов данного предприятия, осуществляются по специально разработываемым программам и маршрутам.

Места отбора проб при таких наблюдениях выбирают на разных расстояниях от источника загрязнения с учетом закономерностей распространения загрязняющих веществ в атмосфере. Отбор проб воздуха производится последовательно по направлению ветра на расстояниях 0,2—0,5, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 15 и 20 км от стационарного источника выброса, а также с наветренной стороны источника.

Наблюдения под факелом проводятся за типичными для данного предприятия ингредиентами с учетом объема выбросов и их токсичности. В зоне максимального загрязнения (по данным расчетов и экспериментальных замеров) отбирается не менее 60 проб воздуха, а в других зонах минимум должен быть не меньше 25. Отбор проб воздуха при проведении подфакельных наблюдений производится на высоте 1,5 м от поверхности земли в течение 20—30 мин не менее чем в трех точках одновременно. В течение рабочего дня под факелом можно отобрать пробы последовательно в 5—8 точках.

В ряде крупных городов России функционируют *системы автоматизированного наблюдения и контроля окружающей среды*

(атмосфера городов) — АНКОС(АГ). Основная задача таких систем — наблюдение за степенью загрязнения атмосферного воздуха и выдача рекомендаций по изменению режима работы предприятий и транспорта в периоды наибольшего загрязнения и при неблагоприятных метеорологических условиях. Система позволяет непрерывно получать информацию о концентрации ЗВ и метеорологических параметрах в населенных пунктах или около крупных промышленных предприятий.

В состав АНКОС(АГ) входят следующие технические средства:

- павильон (металлический каркас размером $2300 \times 4700 \times 7600$ мм;
- мачтовое устройство с комплектом метеодатчиков для измерения скорости и направления ветра, температуры и влажности;
- устройства отопления, вентиляции, освещения, кондиционирования и пожаротушения;
- газоанализаторы CO_2 , SO_2 , N_2O , суммы углеводородов (без метана);
- устройство сбора и обработки информации на базе микро-ЭВМ.

Системы АНКОС(АГ) и Центра обработки информации обеспечивают:

- систематическое измерение заданных параметров воздуха;
- автоматический сбор информации со станций;
- оперативную оценку ситуации по известным значениям ПДК;
- краткосрочный прогноз уровней загрязнения контролируемых ЗВ;
- обработку и выдачу информации.

В Москве в 2001 г. было создано ГУП «Мосэкомониторинг» в рамках создания Единой системы экологического мониторинга Москвы. На сайте <http://www.mosecom.ru/org.html> любой житель может получить информацию об экологической ситуации в городе. Автоматические стационарные станции контроля загрязнения атмосферного воздуха в автоматическом режиме измеряют концентрации CO , NO_2 , NO_x , суммарных углеводородов; на станциях, оснащенных дополнительным оборудованием, контролируется содержание O_3 , пыли, SO_2 , NH_3 , ароматических и алифатических углеводородов (рис. 4.4).



Рис. 4.4. Схема размещения автоматических станций контроля загрязнения атмосферного воздуха в Москве

Региональные проблемы и загрязнение атмосферы

Региональные проблемы, связанные с составом атмосферного воздуха, необходимо рассматривать без отрыва от особенностей человеческой деятельности и особенностей природных условий [2].

Несмотря на различия климата, метеорологических, природных и ландшафтных условий существует много общего в составе и в закономерностях атмосферных процессов в урбанизированных регионах. Именно это позволяет обсуждать проблему с детерминистических позиций и осуществлять мониторинг, который, как говорилось выше, состоит из трех этапов: наблюдения, оценки и прогноза состояния атмосферы городов, пригородных регионов и переходных зон между местами активной человеческой деятельности и местами ее полного отсутствия.

Одним из основных по массе ЗВ является углекислый газ CO_2 . Вместе с кислородом это один из биогенов атмосферы, который в основном контролируется биотой. В XX в. наблюдается

рост концентрации CO_2 , которая с начала века увеличилась почти на 25 %, а за последние 40 лет — на 13 %.

Вклад России в выбросы углерода в атмосферу весьма велик и составляет около 800 млн т/год, т. е. несколько менее 13 % общего количества выбрасываемого в атмосферу углерода. Одной из причин увеличения концентрации CO_2 является вырубка лесов — около 50 млн т/год, другая причина — потери гумуса на пашне — около 80 млн т/год. На осушенных территориях идет «сгорание торфа» за счет деятельности грибов и микроорганизмов (площадь осушения составляет 6,2 млн га), однако ежегодный выброс углерода оценить трудно. Также трудно оценить выбросы диоксида углерода в результате его частичного высвобождения из холодных ловушек заболоченных территорий России, но величина может достигать сотен миллионов т/год [2].

Процессы, идущие на заболоченных и переувлажненных территориях Севера России, способствуют и выбросам другого парникового газа — метана, так как в результате антропогенного воздействия нарушается деятельность бактериального «метанового фильтра» в увлажненных грунтах. Другим источником метана служат утечки газов из нефтяных и газовых скважин, главным образом, в Западной Сибири.

Парниковым газом (группой газов) являются хлорфторуглероды — газы чисто антропогенного происхождения. Диоксид углерода, метан и хлорфторуглероды обеспечивают соответственно 49, 19 и 14 % возможного парникового эффекта.

На территории России насчитывается 99 городов с неблагоприятной экологической обстановкой, 56 из них находятся в Европейской части России, 28 — в Сибири и на Дальнем Востоке, 15 — в Уральском регионе (табл. 4.3).

Таблица 4.3. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу в 1989 г. на одного жителя России, кг/год

Твердые вещества	Сернистый ангидрид	Оксиды азота	Углеводороды	Оксид углерода	Всего
52	67	19	44	56	238

Основными источниками воздушного загрязнения на территории России служат предприятия металлургического комплекса, дающие 27,3 % загрязнения, энергетического комплекса — 21,1, нефтегазопромышленного и нефтехимического комплекса — 19,8 % (в сумме дают более $\frac{2}{3}$ загрязнения атмосферы).

Потоки воздуха разносят поллютанты далеко за пределы городов и промышленных зон, в результате чего ЗВ обнаруживаются на территории России практически повсеместно. Региональные особенности фонового загрязнения территории России соответствуют распределению населения и промышленности. Наибольшее фоновое загрязнение характерно для Европейской части, где по таким показателям, как SO_2 и 3,4-бенз(а)пирен, оно близко к западноевропейскому и приближается к ПДК_{сс}, а по концентрации свинца даже несколько выше. В Сибири и на Дальнем Востоке фоновое загрязнение атмосферы по тем же показателям, как правило, на порядок ниже.

На основной части территории России не отмечается значительного распространения кислых осадков (рН талых вод обычно составляет 5,5—6,0). Кислые осадки выпадают в основном на северо-западе Европейской части России — в Карелии и на Кольском полуострове.

Существенную роль в формировании фонового загрязнения играет трансграничный перенос. Западный перенос обеспечивает поступление на территорию России атмосферных поллютантов из Западной и Восточной Европы, Прибалтийского региона, Украины и Белоруссии. Так, западный перенос SO_2 в Россию в шесть раз больше того, что уходит из России через западную границу. Кроме стационарных источников, свой вклад в загрязнение атмосферы вносит и автотранспорт.

Характеризуя в целом состояние загрязнения атмосферы на территории России, следует подчеркнуть, что в наиболее населенных регионах страны уровень фонового загрязнения атмосферы мало отличается от уровня фонового загрязнения в Западной Европе и США. В особенно сложных условиях живет городское население. Примерно 75 млн городских жителей, что составляет более половины населения страны, испытывают сильное воздействие загрязненного воздуха.

Атмосфера городов и промышленных районов

По данным моделирования (для США), в город с населением 1 млн человек ежедневно поступает 732 тыс. т вещества (вода, пища, топливо). На выходе за каждые сутки образуется около 503 тыс. т вещества. Из них 500 тыс. т приходится на сточные воды, 2 тыс. т — твердые отходы и 1 тыс. т — газообразные и

пылевые загрязняющие вещества. Масса последних распределена условно следующим образом: твердые частицы — 150 т, диоксид серы — 150 т, оксиды азота — 100 т, углеводороды — 100 т, оксид углерода — 450 т.

Для модели города с разнообразными видами промышленно-сти, выбрасывающей ежегодно в атмосферу большой комплекс твердых и газообразных отходов, данные приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4. Выбросы в атмосферу городом с населением 1 млн человек

Ингредиент выбросов	Количество, тыс т/год
Вода (пар, аэрозоль)	10 800
Углекислый газ	1200
Сернистый ангидрид	240
Оксид углерода	240
Пыль	80
Углеводороды	108
Оксиды азота	60
Хлораэрозоли соляной кислоты	5
Сероводород	5
Аммиак	1,4
Фториды (по фтору)	1,2
Сероуглерод	1,0
Цианистый водород	0,3
Соединения свинца	0,05
Никель (в составе пыли)	0,04
Мышьяк	0,03
Уран (в составе пыли)	0,02
Кобальт (в составе пыли)	0,02
Ртуть	0,01

Плотность выброса пыли с 1 км² площади такого города (в модели площадь равна 300 км²) составляет 500 т/год, причем максимум поступления в атмосферу загрязняющих веществ отмечается в зимние месяцы, когда на полную мощность работают ТЭЦ и котельные.

На распределение всей этой массы оказывают влияние следующие факторы:

- размещение промышленных предприятий в городе;
- особенности выброса загрязняющих веществ (высота труб, технология производства, способ утилизации и пр.);
- роза ветров;
- режим атмосферных осадков;
- размер находящихся в атмосфере частиц и их взаимодействие с поверхностью.

Атмосферные частицы классифицируют по размерам следующим образом:

1) крупные частицы (средний диаметр 20 мкм) сосредоточены в нижнем слое тропосферы (до 3000 м), осаждаются под действием силы тяжести, но могут переноситься ветром на большие расстояния;

2) полутонкая пыль (диаметр 0,1—5 мкм) осаждается с трудом или не осаждается вовсе. Частицы размером меньше 1 мкм служат ядрами конденсации водяного пара. Для частиц диаметром менее 0,1 мкм из-за броуновского движения осаждение в обычных условиях невозможно (эти частицы называют аэрозолем);

3) тонкая (микроскопическая) неосаждающаяся пыль (диаметр менее 0,001 мкм) — это так называемые частицы Айткена.

Большинство атмосферных частиц, удерживающихся в воздухе в течение длительного времени, имеет диаметр 0,1—5 мкм. Тонкая и частично полутонкая пыль не осаждается в местах выброса при сухой атмосфере и может поэтому попасть в потоки региональных и глобальных ЗВ. Однако во влажной атмосфере частицы вымываются осадками и могут оказаться на земной поверхности вблизи мест выброса. Газообразные ЗВ также в значительной мере вымываются из атмосферы и оседают на землю с дождем или снегом. Кроме того, находящийся на земле снежный покров не является инертной средой, он участвует в газообмене с прилегающим воздухом.

Итак, масса загрязненного воздуха высотой до 3000 м прикрывает промышленный центр. Внутри него эпизодически или непрерывно увеличивается количество загрязняющих веществ, которые оседают на землю либо распространяются на окружающие территории. В итоге вокруг промышленного центра формируется пятно хронического загрязнения поверхности.

Одним из наиболее опасных загрязняющих веществ в городах является свинец. Основное количество свинца выбрасывается че-

рез автомобильные выхлопы при использовании бензинов, этилированных тетраэтилсвинцом. Свинец накапливается в растениях и почве вдоль автомагистралей, а затем либо с пищей, либо с аэрозольной составляющей попадает в организм человека.

Оценка качества воздуха городов производится сравнением наблюдаемых среднесуточных концентраций с ПДК_{сс}. В последнее время используют также обобщенные показатели качества — индексы загрязнения атмосферы (ИЗА).

Основные проблемы, возникающие в результате регионального загрязнения воздуха

- *в урбанизированных районах:*
 - повышенный риск заболевания населения болезнями, характер которых зависит от типа загрязняющего вещества;
 - повышенный износ конструкций, строений, памятников архитектуры;
 - уменьшение площадей, покрытых растительностью, болезнями деревьев;
 - локальное изменение климата, увеличение числа дождей;
 - отдаленные труднопредсказуемые последствия, связанные с генетическими изменениями (табл. 4.5).
- *в неурбанизированных районах (промежуточных зонах):*
 - уменьшение урожайности культур;
 - оскудение лесов из-за химического поражения;
 - уничтожение отдельных видов животных и организмов;
 - видовое упрощение или снижение видового разнообразия.

Таблица 4.5. Климатические изменения, вносимые урбанизацией

Показатель	В городе по сравнению с условиями сельской местности
Загрязняющие вещества: ядра конденсации частицы газообразные примеси	в 10 раз больше в 10 раз больше в 5—25 раз больше
Солнечная радиация: суммарная на горизонтальной поверхности ультрафиолетовая зимой продолжительность солнечного сияния	на 0—20 % меньше на 30 % меньше на 5—15 % меньше

Окончание табл. 4.5

Показатель	В городе по сравнению с условиями сельской местности
Облачность: облака туман зимой	на 5—15 % больше на 100 % больше
Осадки: количество снегопады в центре города	на 5—15 % больше на 5—10 % меньше
Температура воздуха: среднегодовое значение минимальное значение зимой	на 0,5—3,0 °С больше на 1—2 °С больше
Относительная влажность воздуха: среднегодовое значение	на 6 % меньше
Скорость ветра: среднегодовое значение число безветренных суток	на 20—30 % меньше на 5—20 % больше

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое консервативная и неконсервативная примесь?
2. Что такое организованный и неорганизованный источник загрязнения?
3. Каково время жизни в атмосфере веществ, относящихся к глобальным ЗВ?
4. Приведите классификацию мониторинга по географическим масштабам.
5. Сформулируйте основные принципы выбора приоритетности измерения ЗВ в рамках глобального мониторинга.
6. Как изменяются мониторинговые программы по мере удаления от источника загрязнения?
7. Что такое первичные и вторичные ЗВ?
8. Каковы типы барьеров и их роль в организации систем мониторинга?
9. Что такое система ГСНК(А)?
10. Назовите основные задачи системы ГСНК(А).
11. Назовите основные принципы организации системы ГСНК(А).
12. Назовите три категории постов в региональном мониторинге системы ГСНК(А).
13. Назовите четыре программы наблюдений стационарных постов.

5. ПРИНЦИПЫ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ В МОНИТОРИНГЕ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

Выше был рассмотрен вопрос о том, как изменяется концентрация ЗВ по мере удаления от источника. При проведении импактного мониторинга возникает необходимость измерения концентраций ЗВ, обычно превосходящих ПДК в несколько раз. При региональном мониторинге приходится иметь дело с концентрациями ЗВ на уровне ПДК и ниже. В фоновых зонах регионов и при измерениях базовых концентраций в самых чистых местах планеты приходится работать с очень низкими уровнями ЗВ, обусловленными скорее естественными процессами, чем антропогенной деятельностью.

Важно и то, что по мере удаления от источника аналитическая задача становится все более сложной из-за потери корреляции состава примесей с их составом в каком-то одном источнике. Сначала наблюдается совместное влияние множественных источников, а затем и эта связь исчезает (по крайней мере для недолго живущих в атмосфере веществ) и обнаруживаются вторичные ЗВ, образовавшиеся благодаря атмосферным фотохимическим процессам. Таким образом, по мере удаления от источника возникают все новые аналитические задачи и новые требования к чувствительности приборов и пределам обнаружения методик.

Контактные и дистанционные измерения

Существуют два способа контактных измерений. Первый основан на взятии пробы в каком-либо месте атмосферы, подачи этой пробы на специальную подготовку или непосредственно в измерительный прибор, проведении самого измерения и превращении аналитического сигнала, полученного при этом измерении, в искомое значение измеряемой концентрации.

Возможно и другое исполнение контактного измерения. Измерительный прибор переносится в пространстве, контактируя

все время с измеряемой средой и производя последовательные измерения. Такой метод не требует взятия пробы оператором. Примером может служить зондирование верхних слоев атмосферы с помощью приборов, поднимаемых на аэростатах, самолетах и спутниках. Таким образом, в самом общем случае метод является контактным, если измерительный прибор непосредственно контактирует с измеряемой средой в любой точке пространства и в любое время.

Однако существует и другой способ измерений. Он не требует ни взятия пробы, ни переноса измерительного прибора в место, где производится измерение. Измерительный прибор находится в покое или перемещается в пространстве, удаленном от места измерений на большое расстояние. Такие измерения называются *дистанционными*. Например, все астрономические наблюдения за далекими светилами всегда являются дистанционными. Эти измерения исключительно важны в экологическом мониторинге, правда, в мониторинге атмосферного воздуха их применение не столь широко.

Хорошо известно применение ЛИДАРОВ (LiDAR — light detection and ranging), т. е. лазерных флуоресцентных приборов, с помощью которых удается определить размер и форму области атмосферного загрязнения, тип, концентрацию и скорость распространения ЗВ. Методы активного дистанционного зондирования с использованием лазерных источников излучения обладают несомненным преимуществом среди всех известных методов мониторинга атмосферы, включая всевозможные методы прямых контактных измерений ее параметров, а также методы активного и пассивного дистанционного зондирования. Методы лазерного зондирования, и только они, обеспечивают получение профилей или полей различных параметров атмосферы с исключительно высоким временным и пространственным разрешением, обладая при этом рекордными концентрационными чувствительностями.

Большинство ЛИДАРОВ работает следующим образом:

1. Лазерное излучение передается через оптический блок в направлении мишени (изучаемый объект).

2. Излучение, преобразованное объектом, собирается приемной оптикой и направляется в спектроанализатор, служащий для выделения интервала длин волн, в котором проводятся наблюдения, и, соответственно, отсеки фонового излучения на других длинах волн.

3. После спектроанализатора излучение поступает на систему фотодетектирования.

4. Сигнал фотодетектора подвергается аналоговой или цифровой обработке.

Возможности дистанционных методов несомненно много богаче, чем контактных. Дистанционные измерения могут производиться в *пассивном* или *активном* вариантах. Если источник света имеет искусственное происхождение (как ЛИДАРЫ), то говорят об активном дистанционном измерении. При использовании естественного источника света (Солнце, Луна, звезды) производится пассивное измерение. В случае активных дистанционных измерений имеются довольно широкие возможности, реализуемые при изменении параметров источника света (интенсивность излучения, частота), что помогает решать большее число задач, чем в пассивном варианте. Однако длина трассы измерения в первом варианте намного меньше, поскольку интенсивность света от искусственного источника ослабляется с расстоянием экспоненциально. Именно поэтому активные дистанционные методы перспективны для измерения достаточно высоких концентраций на не очень длинных трассах (до нескольких километров), что представляет несомненный интерес в решении некоторых задач импактного мониторинга (например, наблюдение за ЗВ в атмосферном воздухе городов, над предприятиями). Приборы дистанционного зондирования перспективны для оснащения маршрутных постов.

В свою очередь, пассивные дистанционные измерения могут играть важную роль в глобальном и региональном мониторинге. Такие дистанционные измерения совершенно незаменимы на *зенитных трассах* (определение O_3 с помощью озонметров, определение N_2O). Возможны и измерения в *надир* (вертикально вниз с летящих спутников, самолетов и аэростатов). Ценную информацию о составе атмосферы можно получить при *лимбовых* измерениях, когда атмосфера просматривается в лучах заходящего солнца на трассе, направленной к линии горизонта.

Во всех названных дистанционных активных и пассивных методах могут быть использованы явления поглощения света, его рассеяния, а также явление флуоресценции, как обычной, так и резонансной. Важную информацию дает исследование спектров комбинационного рассеяния (особенно, если в качестве искусственного источника света используется лазер с перестраиваемой частотой).

Дистанционные методы обеспечивают измерение полей концентраций, т. е. функций $c(x, y, z, t)$, что позволяет относительно легко представить картину воздушного загрязнения на карте. Эти методы дают возможность получить вертикальные профили концентраций $c(z, t)_{x,y} = \text{const}$. Кроме того, они позволяют осуществить измерение потоков загрязняющих веществ через какой-либо контур. Это важно при измерении трансграничного переноса ЗВ. Трансграничный поток ЗВ можно определить следующим образом:

$$J = \iint c(x, y, z)u(x, y, z)ds, \quad (5.1)$$

где $u(x, y, z)$ — значения компонент поля скоростей ветра по координатам x, y, z .

Возможным оказывается и определение мощности источника ЗВ:

$$Q = (t_2 - t_1)^{-1} \left[\iiint c(x_2, y_2, z_2, t_2) dx dy dz - \iiint c(x_1, y_1, z_1, t_1) dx dy dz \right] \quad (5.2)$$

Используя дистанционные измерения, можно определить среднее время жизни примеси в атмосфере. Предположим, что кинетика стока вещества описывается уравнением первого порядка. Это означает, что концентрация ЗВ уменьшается по экспоненциальному закону. Пусть измерения проводятся в двух сечениях, время прохождения ЗВ между которыми составляет

$$\Delta t = (R_2 - R_1)/u, \quad (5.3)$$

где u — скорость перемещения воздушных масс; R_2 и R_1 — расстояния, на которых располагаются сечения 2 и 1.

Тогда

$$\tau = \Delta t / \left\{ \ln \left[\int c(R_1) dS / \int c(R_2) dS \right] \right\}. \quad (5.4)$$

Одним из лучших российских приборов для дистанционного зондирования атмосферы являются озонметры М-83 и М-124. Они измеряют концентрацию озона по величине прошедшего через озоновый слой солнечного излучения в двух полосах в УФ-диапазоне, причем выделение измеряемых спектральных участков производится двумя фильтрами с центрами полос 299,0 и 324,7 нм. Благодаря модернизации, которая, учитывая физическое и моральное старение озонметров, проводится с конца

1990-х годов, они остаются основным рабочим инструментом для измерения *общего содержания озона* (ОСО) на 27 озонометрических станциях Росгидромета. Озонометрами М-124 измеряют ОСО на антарктических станциях Мирный, Восток, Новолазаревская, на дрейфующей станции СП-32, на станциях стран СНГ и в ряде других стран и организаций.

В России руководство различными сетями Росгидромета: озонометрической, мониторинга парниковых газов, метеорологической радиолокационной, специализированной атмосферно-электрической осуществляет расположенный в Ленинградской области филиал ГГО им. А. И. Воейкова — Научно-исследовательский центр дистанционного зондирования атмосферы (<http://www.nicdza.ru>).

Измерения дифференциальные и интегральные

Измерение концентрации ЗВ или другого параметра, проведенное в какой-либо точке атмосферы в какое-либо время является дифференциальным по времени и по пространству. Единичное значение величины не даст информации при решении вопроса о загрязнении такой текучей среды, как воздушная. Единичное значение учитывается лишь при определении так называемой максимальной из разовых величин концентраций ЗВ. Чтобы получить осредненные по времени значения требуется тем больше единичных измерений, чем больше интервал осреднения. Надо иметь в виду, что и единичное измерение, строго говоря, обычно не является дифференциальным по времени, так как взятие пробы происходит не мгновенно.

Интегральные величины получаются операцией сложения множества дифференциальных величин и делением полученной суммы на число слагаемых или на иную базу (время, пространственная единица). Этой процедуре лучше всего соответствуют дистанционные методы измерений, дающие возможность определения практически бесконечного множества дифференциальных величин.

Так, например, определение средней на трассе концентрации производится по формуле:

$$c_{\text{cp}} = \frac{1}{L} \int_0^L c(x) dx. \quad (5.5)$$

Такой же способ осреднения используется и на вертикальных зенитных и надирных трассах. Профиль концентраций по высоте определяет функция $c(h)$, которая также легко устанавливается с использованием дистанционных методов.

Осреднение может быть произведено не только по длине, но и по площади или объему V :

$$c_{\text{cp}} = V^{-1} \iiint c(x, y, z) dx dy dz. \quad (5.6)$$

Такие величины можно назвать среднеинтегральными по пространству. Однако интегрирование может производиться также и по времени. В последнем случае получают среднеинтегральные по времени величины.

Инструментальные комплексы САС и УЛАС

В настоящее время в России и за рубежом для диагностики состава атмосферного воздуха используют два типа рабочих инструментальных комплексов.

1. **Специальные автоматические средства (САС)** применяются для контроля микрокомпонентов, имеющих национальное и глобальное значение (приоритетные компоненты). Приборы САС обычно жестко настроены на определение одной примеси. Их задача — измерение ЗВ из довольно ограниченного списка веществ антропогенного происхождения (SO_2 , NO_x , CO , углеводороды, CO_2 , Hg). Комплекс САС включает ряд автоматических хемилюминесцентных, пламенно-ионизационных, кулонометрических газоанализаторов, входящих также в состав действующей в нескольких городах России системы АНКОН-АГ (системы автоматического наблюдения и контроля окружающей среды — атмосферы городов).

2. **Универсальные лабораторные автоматизированные средства (УЛАС)**, обеспечивающие контроль широкого диапазона ЗВ регионального и локального значения (неприоритетные компоненты). Считается, что эта задача может быть решена путем создания в стране системы отбора и анализа проб воздуха, состоящей из 20—30 региональных лабораторий, оснащенных такими универсальными лабораторными средствами, как атомно-абсорбционные спектрометры, эмиссионные спектрометры индукционно связанной плазмы, хроматографы и хромато-масс-спектрометры.

Газоанализаторы — контактные приборы непрерывного наблюдения

Невозможно и не нужно создавать приборы непрерывного наблюдения за всеми возможными приоритетными загрязняющими веществами на всех уровнях мониторинга. Однако крайне важно иметь такие приборы для контроля за самыми важными ЗВ, особенно при контроле загрязнения городского воздуха. К таким ЗВ относятся следующие вещества: SO_2 , CO , NO_x , O_3 , углеводороды и реже H_2S и Cl_2 . Газоанализаторами для первых двух из названных ЗВ оснащены стационарные посты ПОСТ-1 и ПОСТ-2.

Сероводород и хлор являются веществами специфическими, свидетельствующими о наличии в городе определенных производств (химических, нефтехимических, коксохимических). Они попадают в список еще и потому, что легко регистрируются с помощью весьма простых датчиков.

Успех создания газоанализаторов той или иной газовой примеси полностью зависит от наличия простых, надежных, чувствительных и селективных датчиков (сенсоров). К сожалению, можно назвать не более десятка селективных датчиков отдельных примесей, поэтому парк газоанализаторов невелик.

Наиболее широко используются два принципа регистрации:

- 1) электрохимический;
- 2) оптический.

Именно на них основано подавляющее большинство газоанализаторов (табл. 5.1).

Определение SO_2 , O_3 , H_2S , Cl_2 базируется на окислительно-восстановительных реакциях и применении **кулонометрических** методов регистрации веществ, участвующих в электродных реакциях. В этом случае возможно создание весьма компактных ячеек-сенсоров, отвечающих требованиям высокой чувствительности и хорошей селективности. **Потенциометрические** и **кондуктометрические** измерения также нашли применение при создании газочувствительных электродов. Существуют газовые потенциометрические датчики, позволяющие определять CO_2 , SO_2 , H_2S , NO_2 , HF , HCN , NH_3 .

Оптический принцип измерений открывает широкие возможности для создания недорогих приборов, отвечающих всем метрологическим требованиям при измерении многочисленных

Таблица 5.1. Примеры газоанализаторов

Тип ГА	Принцип действия	Регистрируемая примесь	Диапазоны измерений
ГАЗОТЕСТ	Электрохимический	CO SO_2 O_2 NO NO_2	0—1000 ppm; 0—1000 ppm; 0—21 %; 0—400 ppm; 0—150 ppm
ГИАМ-22	Оптико-акустический	CH (по C_6H_{14}) CO	0—5000 ppm; 0—5 %
ГИАМ-10М	Оптико-акустический	CO CO_2 CH_4 NO SO_2	0—2000 ppm; 0—50 ppm; 0—1 % 0—200 ppm; 0—1 и 0—2 г/м ³ 0—60 г/м ³
645ХЛ-01	Хемилюминесцентный	NO , NO_2 , NO_x	0—0,25; 0—7,5
645ХЛ-03	Хемилюминесцентный	NO , NO_2 , NO_x	0—10
623ИН-02	Пламенно-ионизационный	ΣCH ; CH_4 ; ΣCH и CH_4	0—5; 0—15; 0—50
667ФФ-01	Флуоресцентный	SO_2	0—5 мг/м ³

примесей на уровне их ПДК и ниже. Здесь используются *точные фотокориметры* (определение SO_2 , O_3 , H_2S , NO_2 , HF). *Хемилюминесцентные сенсоры* дают возможность определять оксиды азота, а *оптико-акустические детекторы* могут быть настроены на определение почти всех веществ, имеющих характеристические полосы поглощения в ИК-области.

Для измерения концентрации органических веществ в импактных зонах предприятий (химических, нефтехимических) могут использоваться газоанализаторы, оснащенные *пламенно-ионизационными детекторами*, которые, как известно, широко используются также и как неселективные детекторы газовых *хроматографов*. Отсутствие селективности не дает возможности делать количественный вещественный анализ, а позволяет судить лишь об общей картине загрязнения атмосферы органическими веществами.

Большое значение имеют измерения концентрации пыли в атмосферном воздухе. Для этого применяются приборы, использующие различные принципы измерений. В табл. 5.2 приведены несколько типов этих приборов и даны их характеристики.

Таблица 5.2. Российские приборы для измерения концентрации пыли в атмосферном воздухе

Тип прибора	Метод измерения
ПГА	Весовой
ПРИЗ	Радиоизотопный
ИЗА-02	Фотометрический
СМОГ-1	Фотометрический
ЭПЦ	Индукционный

Снежный покров как индикатор регионального загрязнения воздуха

В региональных системах мониторинга атмосферного воздуха большое внимание уделяется наблюдениям за степенью загрязнения снежного покрова, оно исключительно четко коррелирует с загрязнением атмосферного воздуха и несет информацию о «сухих» и «мокрых» выпадениях. В настоящее время в Российской Федерации организована система мониторинга снежного покрова, функционирующая на базе сети снегомерной съемки. Последняя проводится Росгидрометом как часть программы получения данных для государственного водного кадастра (ГВК), одна из целей которого — учет всех запасов поверхностных вод страны.

Снегомерная съемка проводится давно. Она всегда использовалась для определения запасов влаги в почве, необходимого при сельскохозяйственных работах. На территории России функционировало около 7 тыс. снегомерных пунктов. Таким образом, придание пунктам снегомерной съемки новой функции — измерения концентрации приоритетных загрязняющих веществ — стало совершенно естественным дополнением к их работе.

Достоинства мониторинга снежного покрова состоят в следующем:

- отбор проб прост и не требует специального оборудования;
- послыйный отбор проб позволяет определить историю загрязнения воздушной среды на протяжении всего снежного сезона;
- снег самым естественным образом обеспечивает концентрирование примесей по сравнению с воздушной средой, что упрощает последующую задачу анализа примесей;

- только одной пробы на максимуме влагосодержания достаточно, чтобы определить среднесинтегральные концентрации приоритетных примесей за снежный период;
- мониторинг снежного покрова даст возможность оценить величину трансграничного переноса серы и азота аммонийного.

Из 7 тыс. упомянутых пунктов снегомерной съемки одна тысяча производит химический мониторинг. Плотность сети в европейской части России — 1 пункт на 8 тыс. км², в азиатской части — 1 пункт на 30 тыс. км². Мониторинг охватывает 18,3 млн км² территории России. Это практически вся ее площадь (табл. 5.3).

Таблица 5.3. Загрязненность территории СССР по данным снегомерной (1985—1986 гг.), кг/(км² сут)

Регион	SO ₄ ²⁻	NO ₃	NH ₄
Территории вокруг города с развитой промышленностью и энергетикой	>4	>3—4	>2
Территории, примыкающие к промышленным регионам	2—3	0,5—1	0,5—1
Территории, удаленные от промышленных регионов	1—2	0,25—0,5	0,25—0,5
Арктическая зона севернее 80° с.ш.	0,03—0,06	0,05	0,07

Отбор проб производится один раз в год на максимуме влагосодержания. В различных регионах России время взятия пробы меняется. Например, в Московской области проба берется во 2-й или в 3-й декаде марта, а на острове Диксон — в 3-й декаде апреля или даже во 2-й декаде мая.

Наблюдения организованы за следующими веществами: O₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺ и рН. Около 30 % пунктов дают информацию о тяжелых металлах и полиароматических углеводородах.

Наиболее плотная сеть пунктов наблюдения была создана в густонаселенных регионах, а также вдоль западной границы СССР. Пограничные станции были ответственны за осуществление мониторинга трансграничных переносов. Около 40 % пунктов оценивают загрязненность снега вокруг городов, еще 40 контролируют распространение ЗВ от промышленных центров в более чистые регионы, а 20 % выполняют функции фонового мониторинга.

Подфакельные измерения

Наблюдения за распространением дымовых факелов предприятий и производство измерений концентраций нормируемых примесей в них надежнее и проще всего можно осуществить с помощью дистанционных методов. Сравнительно широкое применение **корреляционных спектрометров** и **радиометров** для таких наблюдений обусловлено простотой устройства и эксплуатации этих недисперсионных приборов, их малыми габаритами, массой и небольшой стоимостью. Для детектирования SO_2 и NO_x (УФ и видимый диапазоны) за рубежом выпускаются серийные приборы. Используются пассивные и активные методы. Приборы с газонаполненными кюветами, регистрирующие излучение в ИК-диапазоне, могут быть легко перестроены для обнаружения практически любого газа, не взаимодействующего со стенками рабочих кювет.

Регистрация собственного излучения газов осуществляется также корреляционными приборами — **тепловизорами**. Максимум теплового излучения газами дымовых шлейфов, температура которых находится в пределах 220—500 К, приходится на спектральный диапазон от 6 до 13 мкм. Таким образом, измерения следует проводить в средней и дальней ИК-областях, а также в микроволновом диапазоне. Регистрация теплового излучения газов возможна в любое время суток, включая и ночное, тогда как при измерениях прямого или рассеянного солнечного излучения время измерения ограничено, как правило, интервалом, в течение которого угловая высота Солнца над горизонтом имеет значение не менее 30° .

Наиболее простой схемой измерений с помощью корреляционных спектрометров и радиометров является динамическая схема с размещением приборов на автомобиле. Возможно как установление внешней формы факела, так и выявление его внутренней структуры. Это позволяет рассчитать выброс источником любой детектируемой примеси.

При статических измерениях прибор располагается на некотором удалении от источника дымового факела (до нескольких километров), и сканирование (последовательный просмотр факела по различным трассам) шлейфа производится путем поворота всего прибора в целом или одной только системы ввода излучения.

Корреляционные спектрометры можно использовать для исследования структуры факелов на расстоянии до 50 км.

Применение корреляционной спектроскопии в активном варианте абсорбционного метода расширяет возможности исследования дымовых факелов, позволяя производить измерения не только в любое время суток, но и при любых метеорологических условиях. Однако дальность измерений сокращается до нескольких километров.

Подобно корреляционным приборам **Фурье-спектрометры** можно использовать как в пассивных, так и в активных вариантах дистанционных измерений. Эта также недисперсионная аппаратура стала широко применяться в количественном анализе после внедрения компьютерных методов Фурье-преобразования сигналов. Последнее заменяет сканирование по всем частотам, осуществляемое в дисперсионных приборах. Измерение одновременно на всех частотах выбранного диапазона резко сокращает время анализа, так как детектируемый полезный сигнал возлеществует на детектор в течение всего периода наблюдения, а в случае дисперсионных спектрометров это время составляет весьма малую долю длительности наблюдения. Для разрешения полезного сигнала и уменьшения погрешности измерений при использовании дисперсионных приборов приходится производить множественные сканирования по частоте (иногда тысячи и даже десятки тысяч раз), что удлиняет требуемое время наблюдения до величин, не приемлемых в подфакельных наблюдениях.

Однако Фурье-спектрометры громоздки, массивны и очень чувствительны к механическим вибрациям. Все это вынуждает использовать их только в статическом варианте.

Отмеченные недостатки Фурье-спектрометров компенсируются их весьма существенными преимуществами:

- уникальной универсальностью;
- высокой надежностью данных.

Измерения в мониторинге трансграничного переноса

Рост объемов использования ископаемого топлива на энергетические и другие нужды привел к появлению огромных выбросов загрязняющих веществ в воздух и вызвал сложную экологическую проблему переноса ЗВ на большие расстояния.

В соответствии с общеевропейской совместной программой наблюдения и оценки переноса на большие расстояния загрязняющих веществ в Европе, исходя из потребностей Российской Федерации, была создана **автоматизированная информационная система расчета трансграничного переноса (АИСРТП)**, параллельно выполняющая функции восточно-европейского центра программы.

В 1982 г. была сдана в постоянную эксплуатацию первая очередь этой системы, которая обеспечивает выдачу оперативной и сводной информации о трансграничных потоках (в обоих направлениях) соединений серы через западную границу СССР и граничный контур сопредельных стран — бывших членов СЭВ. Техничко-экономические расчеты показали целесообразность построения АИСРТП на базе модельных расчетов потоков ЗВ в атмосфере с верификацией модели по данным эпизодических измерений с самолета и немногих измерительных станций на контрольных участках границы.

Альтернативна состоит в построении системы, основанной на создании достаточного числа пробоотборных станций для измерения приземных концентраций и выпадений и контроля профилей потоков с помощью самолетов-лабораторий, шаров-зондов или иной беспилотной аппаратуры. В этом случае оперативная информация предварительно анализируется на местах и направляется в центр обработки информации, где с учетом метеоданных проводится синтез всей картины движения ЗВ. Этот вариант требует, однако, значительных капиталовложений и больших эксплуатационных затрат, не обеспечивая большей точности по сравнению с математическим моделированием.

В состав АИСРТП входят следующие основные блоки:

- информации об источниках выбросов. В нем имеются информация о суммарной мощности источников в каждом квадрате сетки, а также данные о поле скоростей ветра и интенсивности осадков;
- информации о фактической метеоситуации, которая преобразуется в поле скоростей ветра и интенсивности осадков;
- оперативного расчета потоков, на вход которого поступает информация из первых двух блоков;
- контроля, редактирования и распределения выходной информации потребителям;

- обобщения информации и верификации моделей, включая проверку по данным измерений с самолетов и на пробоотборных станциях.

Расчеты потоков проводят за каждый 6-часовой период, данные обобщают за неделю, декаду, месяц, год. Верификация данных моделирования по данным наземных контактных и дистанционных измерений показывает, что часто получают расхождения результатов в два-три раза. Однако использование второго варианта не дает более точных результатов.

Фоновые измерения

Низкие пределы обнаружения дистанционных методов (длинные трассы равносильны использованию длинных кювет) обеспечили им лидирующую роль в обнаружении присутствующих в атмосфере малых примесей антропогенного происхождения.

Например, по спектрам прошедшего через атмосферу солнечного излучения были сделаны оценки общего содержания O_3 , N_2O , NO , NO_2 , HNO_2 , CH_4 , ClO и других газов в атмосфере. Достаточно низкие пределы обнаружения обеспечивают фильтровые, корреляционные спектрометры и радиометры, а также сканирующие и растровые Фурье-спектрометры (средства САС).

Наиболее систематизированно организованы наблюдения общего содержания озона во всей толще атмосферы. Существует мировая озонметрическая сеть, состоящая более чем из 100 станций наблюдения.

Общим недостатком всех фильтровых приборов является старение светофильтров.

Биологические наблюдения в мониторинге атмосферного воздуха

При проведении оценки качества объектов окружающей среды необходимо определять как реально существующую, так и возможную в будущем степень нарушения окружающей среды. Для этого используют два принципиально разных подхода: физико-химический и биологический. Биологический подход развивается в рамках направления, которое получило название **биомониторинга**.

Биомониторинг является составной частью экологического мониторинга, и в его задачи входит регулярно проводимая оценка качества окружающей среды с помощью специально выбранных для этой цели живых объектов.

Поскольку растения в целом обладают относительно высокой чувствительностью к воздействию некоторых загрязняющих веществ, их можно использовать в качестве индикаторов для выявления загрязнения и определения его уровня, а также при осуществлении мониторинга состояния загрязнения атмосферы. Если растения способны накапливать загрязняющие вещества без изменения их химического состава за счет процессов метаболизма, и если эти аккумулированные вещества могут быть легко идентифицированы в образцах растения, то по концентрации ЗВ в этих растениях можно определять уровень загрязнения.

Использование растений чрезвычайно удобно для определения уровня, а иногда и состава ЗВ, что дает возможность осуществлять мониторинг эффектов воздействия загрязняющих веществ. Для этого чрезвычайно важно соблюдать следующие условия:

- воздействия должны приводить к заметной реакции растения на загрязнение воздуха;
- эффекты воздействия должны хорошо воспроизводиться при использовании растений генетически подобных популяций;
- эффекты воздействия должны характеризоваться специфическими симптомами, свойственными воздействию индивидуальных загрязняющих веществ;
- растения должны быть очень чувствительны даже к весьма низким концентрациям загрязняющих веществ;
- растения должны хорошо развиваться и быть устойчивыми к заболеваниям, воздействию насекомых.

В настоящее время известно несколько типов эффектов воздействия загрязнения воздуха на растения, которые можно условно подразделить на эффекты:

- 1) острого воздействия высоких концентраций ЗВ за короткий промежуток времени;
- 2) хронического воздействия низких концентраций ЗВ за продолжительный период.

Примерами первого типа являются хлороз или некроз ткани листьев, опадание листьев, плодов, лепестков цветов, свертывание листьев, искривление стеблей. К эффектам хронического воздействия относится замедление или прекращение нормально-

го роста и развития растений, хлороз и некроз верхушек листьев, медленное увядание растения или его органов.

Наиболее развиты системы регионального биомониторинга в Германии и Нидерландах.

В качестве примера рассмотрим одну из систем биомониторинга, принятую в Германии, она предполагает оценку следующих показателей:

- степени дефолиации (преждевременной потери листьев и хвои) бука, ели и пихты;
- состава ЗВ в листьях и хвое;
- сукцессии (закономерной смены) травянистой растительности;
- жизненности травостоя и содержания в нем ЗВ;
- площади покрытия эпифитных лишайников (живущих на поверхностях других растительных организмов и пользующихся ими только как точкой опоры);
- численности коллембол (мелких почвенных членистоногих) и наземных моллюсков;
- аккумуляции ЗВ в дождевых червях.

Мониторинг биологических эффектов воздействия загрязнения воздуха на растительность с использованием индикаторных и аккумулирующих видов растений применяется для оценки воздействия в локальном, региональном и национальном масштабах.

При локальном мониторинге растения используют для оценки влияния одного или группы источников загрязнения воздуха на урожай садовых, сельскохозяйственных, лесных и дикорастущих растений. Такие же индикаторы и накопители могут быть использованы для обоснования требований по возмещению экономического ущерба.

Использование системы мониторинга в региональном или национальном масштабах позволяет оценить биологические эффекты воздействия загрязнения воздуха на растительность, их пространственно-временное распределение на значительной территории, выделить основные районы внутри региона либо государства, подверженные воздействию загрязнения воздуха, выполнить сравнения состояния различных территорий по степени воздействия на них загрязняющих веществ.

При проведении продолжительных наблюдений также возможно изучение тенденций изменчивости эффектов воздействия загрязнения, повторяемости эпизодов значительного загрязне-

ния воздуха, например, влияние максимальных концентраций озона, регистрируемых летом, на состояние растительности.

В каждом случае выбор определенного вида растений и условий, при которых проводятся наблюдения, должны соответствовать цели исследования. Если известен тип вещества, вначале необходимо выбрать вид растения, обладающего особой чувствительностью к воздействию этого вещества. Если состав воздуха неизвестен, целесообразно последовательно использовать различные виды растений, обладающих высокой чувствительностью к воздействию различных загрязняющих веществ.

Биоиндикация — это оценка состояния среды обитания и ее отдельных характеристик по состоянию биоты в природных условиях, проводимая с использованием живых объектов, в качестве которых могут рассматриваться клетки, организмы, популяции, сообщества. С их помощью производится оценка как абиотических факторов (температуры, влажности, кислотности, солености, содержания ЗВ и т. д.), так и биотических (благополучия организмов, их популяций и сообществ).

Существуют три случая, когда биоиндикация становится незаменимой:

1. Фактор не может быть измерен. Это особенно характерно для попыток реконструкции климата прошлых эпох.

2. Фактор трудно измерить. Некоторые пестициды так быстро разлагаются, что не позволяют выявить их начальную концентрацию.

3. Фактор легко измерить, но трудно интерпретировать. Данные о концентрациях ЗВ в окружающей среде не дают ответа на вопрос, насколько ситуация опасна для живой природы. Есть чувствительные виды, могущие оказаться ключевыми для поддержания экосистем, для которых нельзя руководствоваться установленными ПДК. С точки зрения охраны природы важно получить ответ на вопрос, к каким последствиям приведет та или иная концентрация ЗВ в природе.

Актуальность биоиндикации обусловлена простотой, скоростью и дешевизной метода. Например, при засолении почвы в городе листья липы желтеют по краям еще до наступления осени. Выявить такие участки засоленной почвы можно простым осмотром.

Биоиндикация может быть *специфической* и *неспецифической*. В первом случае изменения в живой системе можно связать только с одним фактором, например, высокая концентрация озона в воз-

духе вызывает появление на листьях табака (сорт Bel W3) серебристых некрозных пятен. Во втором случае различные факторы вызывают одну и ту же реакцию, например, снижение численности почвенных беспозвоночных может происходить и при различных видах загрязнения, и при вытаптывании почвы, и в период засухи.

Биоиндикаторы — это биологические объекты, используемые для оценки состояния окружающей среды.

Критериями выбора биоиндикатора являются:

- быстрый ответ;
- надежность;
- простота;
- мониторинговые возможности (постоянно присутствующий в природе объект).

Индикаторные растения при более или менее стандартизированных естественных условиях могут быть использованы для определения уровня загрязняющих веществ и эффектов их острого воздействия, а также для определения интенсивности и пространственно-временного распределения этих эффектов (табл. 5.4).

Таблица 5.4. Индикаторные и аккумулярующие виды растений, используемые для оценки эффектов воздействия

Вид растения	Загрязняющее вещество	Эффект
Гладиолус	HF	Некроз краев листьев
Табак	O ₃	Некротические пятна на верхней части листа
Крапива жгучая	Пероксиацетилнитрат	Некротические пятна круглой формы на нижней части листа
Люцерна, гречиха	SO ₂	Некроз между прожилками листьев
Петуния	Этилен	Уменьшение размера цветов, отсутствие развития бутонов

Для уменьшения влияния побочных эффектов на результаты исследования необходима стандартизация индикаторных и аккумулярующих видов растений. Особое значение приобретают вопросы выбора определенного вида растения и условий его роста. Семена или иной используемый растительный материал должны быть генетически однородны. Условия роста растений должны быть оптимальными и близкими во всех районах, в которых проводится мониторинг.

Основной проблемой использования растений-биоиндикаторов для мониторинга воздействий загрязнения является оценка

эффекта одновременного воздействия на растения нескольких ЗВ, находящихся в воздухе.

Воздействие двух или нескольких ЗВ может быть аддитивным, антагонистическим или синергетическим. Это означает, что интенсивность воздействия сочетания загрязняющих соединений может быть равной, меньшей или превышающей сумму интенсивности воздействия каждого вещества в отдельности при одних и тех же концентрациях и внешних условиях. Более того, интенсивность суммарных эффектов может быть различной для смеси одних и тех же загрязняющих веществ, но отличающихся соотношением между концентрациями поллютантов в смеси, периодом воздействия, значениями уровня концентраций.

При отсутствии необходимой информации о составе загрязняющих веществ и их концентрациях чрезвычайно трудно интерпретировать эффекты воздействия смеси этих веществ на растительность. По этой причине *идеальное растение-индикатор должно обладать исключительной чувствительностью к действию только одного загрязняющего вещества*. Поскольку такими свойствами не обладает подавляющее большинство растений, среди индикаторных видов целесообразно выбирать такие, которые бы обладали возможно большей чувствительностью к воздействию только одного вещества.

Аэрокосмические наблюдения

Аэрокосмический мониторинг — уникальная информационная система, поскольку только оно позволяет легко получить осредненные по большим масштабам (в пространстве и во времени) интегральные признаки и характеристики экосистем. Аэрокосмический метод — основной в решении задачи слежения за динамикой антропогенных изменений в экосистемах на больших площадях.

Для этой цели, помимо самолетных и аэростатных средств, широко используются специальные спутники и спутниковые системы — российские «Электро» (ГОМС), «Метеор» и «Метеор-3М», «Океан» и «Океан-О», «Ресурс», «NOAA», а также «ERTS» (Earth's Resources Technology Satellite), «SKYLAB» и «LANDSAT».

Метеорологическая система с геостационарным космическим аппаратом «Электро» (ГОМС) позволяет:

- получать в видимом и ИК-диапазонах спектра изображения облачности, поверхности Земли, снежных и ледяных полей;
- проводить непрерывные наблюдения за динамикой быстроменяющихся атмосферных процессов;
- оперативно обнаруживать опасные явления природы;
- определять скорость и направление ветра на нескольких уровнях, температуру морской поверхности и другие характеристики;
- получать информацию о потоках частиц солнечного и галактического происхождения, электромагнитного, ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца, вариаций вектора магнитного поля.

В настоящее время в целях получения данных для гидрометеорологического, гелиогеофизического обеспечения и глобального экологического мониторинга в России эксплуатируется космическая гидрометеорологическая система «Метеор-3», космические аппараты которой функционируют на приполярных круговых орбитах. Комплекс научной аппаратуры позволяет оперативно получать два раза в сутки изображения облачности и подстилающей поверхности в видимом и ИК-диапазонах, данные о температуре и влажности воздуха, температуре морской поверхности и облаков. Данные о потоках корпускулярных излучений, рентгеновского излучения и суммарного энерговыделения всех излучений поступают в геофизическую службу. Осуществляется мониторинг озоносферы.

К информации, получаемой со спутников и используемой при организации экологического мониторинга, относится информация о состоянии лесов, сельскохозяйственных угодий, о растительности на суше и о сезонных изменениях ее состояния, о фитопланктоне моря, состоянии земной поверхности (почвенном покрове, нарушении земной поверхности в результате антропогенной деятельности, эрозионных процессах, об урбанизационных процессах), перераспределении водных ресурсов, загрязнении атмосферы, морей и суши.

Как видим, исследование загрязнения атмосферы — одна из возможных задач аэрокосмического мониторинга, причем не самая главная.

В аэрокосмическом мониторинге в основном используются пассивные методы измерения. Среди них наибольшее распространение получил метод многозональной видеоинформации (МВИ), получаемой с использованием специальных приборов — сканеров типа MSS (multispectral scanners), работающих в четырех полосах ИК-излучения 0,5—0,6; 0,6—0,7; 0,7—0,8 и 0,8—1,1 мкм. Этот способ получения информации в основном используется на спутниках США. Российские спутники первоначально были оснащены приборами для получения фотографических снимков в различных диапазонах спектра. Позднее эти спутники также стали использовать мультиспектральные сканеры.

Для многозональных спектральных съемок используется излучение в диапазоне длин волн, относящихся к окнам прозрачности атмосферы. УФ-излучение с длинами волн короче 300 нм при таких съемках не используется, поскольку оно практически полностью поглощается атмосферой. Видимое излучение легко проходит через атмосферу Земли (кроме нескольких узких полос поглощения) и поэтому с успехом применяется в спектральных съемках, также как и излучение в ближней ИК-области, которое чаще всего используют для изучения природных ресурсов и состояния природных сред, выделения антропогенных эффектов. Для многоцелевого зондирования удобен также диапазон ИК-области 8—15 мкм, поскольку здесь практически отсутствует поглощение в атмосфере, а также тепловой и радиодиапазон. В целом ценность информации о подстилающей поверхности и об атмосфере зависит от правильности выбора диапазонов длин волн.

В данном пособии в основном рассмотрен мониторинг атмосферного воздуха. Надо признать, что получить информацию о вещественном составе пассивными методами крайне сложно. Применение же активных лазерных методов, способных обеспечить получение сведений о составе и содержании примесей возможно, но сильно осложнено целым рядом явлений в атмосфере, создающих значительные помехи для измерений концентраций ЗВ на протяженных трассах (атмосферный шум).

Даже в самых благоприятных условиях 54 % сигнала МВИ определяется так называемой атмосферной дымкой. Существенные помехи возникают из-за турбулентности атмосферы. Поэтому простое измерение поглощения света на какой-то длине волны не позволяет сделать однозначных выводов аэроаналитического характера. Чтобы уменьшить уровень шума, применяют двухчастотный метод или методы нормирования сигнала. Оба

названных приема основаны на простом соображении. Если измерить параметры светового потока на двух достаточно близких частотах, одна из которых совпадает с частотой максимального поглощения примесью, а вторая находится за пределами максимума, то, взяв отношение интенсивностей проходящего через исследуемую среду света, получают результат, почти лишенный влияния случайных факторов (шума). Действительно шум одинаковым образом отражается на величинах и в числителе, и в знаменателе, поэтому отношение этих величин оказывается почти лишенным влияния шума. Заметим, что полное исключение влияния внешнего шума возможно только при равенстве основной и опорной частот. Однако при этом исчезает возможность осуществления самого сравнительного измерения.

Процесс нормирования на опорный сигнал использует этот же принцип. Лучше всего оба приема реализуются при использовании активных дистанционных измерений с мощным монохроматическим источником света — лазером. Для двухчастотных измерений лазер должен быть настраиваемым на две или более частоты. При нормировании на опорный сигнал можно использовать и одночастотные лазеры.

Появление опорного сигнала другой частоты связано с некоторыми естественными процессами в зондируемом объекте. Например, если лазерный метод используется для регистрации летящим вертолетом загрязнения поверхности воды нефтяной пленкой, то посылаемый с вертолета лазерный луч создает флуоресцентный сигнал нефтяного загрязнения и одновременно возбуждает молекулы воды, которые создают эхо-сигнал комбинационного рассеяния. Взяв отношение флуоресцентной компоненты к компоненте комбинационного рассеяния, производят операцию нормирования первого сигнала на второй. Полученное отношение будет мало зависеть от процессов в атмосфере (туман, дымка, турбулентность).

МВИ-снимки перспективно использовать при определении степени загрязненности атмосферы пылевыми и аэрозольными частицами. В видимом диапазоне света удается надежно идентифицировать пылевые выбросы трубами ТЭЦ, пожарами и т. п. и определить интенсивность этих потоков и длину распространения. В ИК-диапазоне легко установить тепловые выбросы и определить их мощность. Наблюдения за дымовыми выбросами позволяют установить концентрацию частиц в факелах. Ингре-

диенты факелов можно определить по поглощению света в различных участках спектра.

Косвенный метод определения загрязнения атмосферы основан на регистрации степени поражения хвойной растительности дымовыми выбросами. Такой метод использовался спутником ERTS-1, на котором измерялась спектральная яркость в диапазонах 0,5—0,7 и 0,8—0,9 мкм.

Спутники системы «Метеор-Природа» оборудованы специальными многоспектральными сканерами, спектрометрами и микроволновыми радиометрами, которые позволяют выделять шлейфы аэрозолей антропогенного происхождения в городах и промышленных районах.

Одна из первых установок активного дистанционного зондирования была установлена в 1983 г. на спутнике «Космос-1500». Результаты спутниковых наблюдений показали, что шлейфы антропогенных аэрозолей распространяются на сотни и тысячи километров. Иногда почти вся территория Европы покрывается дымкой антропогенного происхождения.

Перспективы дальнейшего развития спутникового дистанционного зондирования тропосферы связаны, прежде всего, с решением проблем глобального круговорота воды, динамики облачного покрова, взаимодействия атмосферы и океана, атмосферной циркуляции в тропиках и изменяющегося газового состава тропосферы.

Особенно важное значение имеет долговременная эволюция состава средней атмосферы, в значительной степени обусловленная антропогенным воздействием. Для понимания этой эволюции необходимы данные обо всех долгоживущих основных компонентах средней атмосферы, включая источники радикалов, сами радикалы и молекулы — «стоки», обуславливающие удаление активных компонентов на протяжении как минимум одного одиннадцатилетнего цикла солнечной активности. Эти проблемы будут частично устранены при помощи аппаратуры, установленной на спутник VARS с целью изучения верхней атмосферы. Спутник VARS позволил выполнить дистанционное зондирование атмосферы в диапазоне высот 0—150 км.

Для определения состава атмосферы и температуры на спутнике установлены следующие приборы:

- криогенный (на твердом неоне, $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$) лимбовый спектрометр, позволяющий восстанавливать вертикальные профили концентраций различных компонентов семейств азо-

та и хлора, озона, водяного пара, метана и CO_2 (20 датчиков дают возможность одновременных измерений на 20 уровнях);

- зонд для исследования стратосферы и мезосферы типа «ISAMS», позволяющий устанавливать содержание соединений азота, озона, водяного пара, метана и оксида углерода;
- микроволновый лимбовый зонд для восстановления вертикальных профилей концентрации оксида хлора, H_2O_2 , водяного пара и озона;
- аппаратура затменного эксперимента по измерению галогенов «HALOE», основанная на принципе измерения поглощения в ИК-диапазоне на «затменных» трассах солнечной радиации;
- комплекс аппаратуры для изучения горизонтальной компоненты поля скоростей ветра в верхней атмосфере (доплеровский видеоспектрометр высокого разрешения и видеоинтерферометр);
- монитор солнечного спектрального УФ-излучения для измерений внеатмосферной инсоляции;
- специальный трехканальный спектрометр для сравнения излучения Солнца (днем) и устойчиво ярких голубых звезд (ночью);
- монитор для измерения заряженных частиц (их типа, количества, энергии), вторгающихся в атмосферу.

В последнее время проведен ряд разработок и исследований по уточнению и развитию системы экологического мониторинга. Особое внимание уделено спутниковой аппаратуре различного назначения. Дальнейшее развитие существующих средств наблюдений планируется сконцентрировать на расширении средств наблюдений в радиодиапазоне, повышении пространственной разрешающей способности данных, получении стереоскопических изображений.

Инструментальные методы анализа в мониторинге атмосферного воздуха

Для инструментального анализа состава газовых смесей применяют многочисленные физико-химические методы газового анализа, однако наиболее распространены электрохимические,

оптические, пламенно-ионизационные и хроматографические методы.

Электрохимические методы в основном включают кондуктометрический и кулонометрический методы. Суть их состоит в том, что для некоторых газов существует возможность подбора химического состава датчиков таким образом, чтобы при соприкосновении материалов датчика с анализируемыми компонентами газовой смеси появлялся бы потенциал на поверхности соприкосновения (электрохимический эффект).

Работа *кондуктометрических анализаторов* заключается в регистрации изменений электропроводности раствора, возникающей в результате поглощения газовой смеси. Кондуктометрический метод не требует применения сложной аппаратуры, приборы обладают высокой чувствительностью, быстродействием и компактностью. Недостатком метода является его неселективность: все растворяющиеся в реактиве с образованием ионов газы сильно влияют на электропроводность электролита. Кроме того, на точность измерений влияет температура, приборы нуждаются в частой смене электролита и имеют нелинейную шкалу.

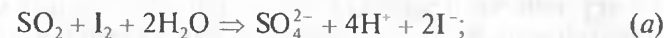
Указанный недостаток — неселективность — становится достоинством, если кондуктометрический детектор используется как универсальный в ионной хроматографии. Универсальность позволяет регистрировать любое вещество, изменяющее электропроводность подвижной фазы, а селективность достигается на стадии хроматографического разделения ионов.

Кулонометрический метод состоит в непрерывном автоматическом титровании вещества реагентом, электрохимически генерируемым на одном из электродов в реакционной среде. При этом количество электричества, затраченное на генерацию титрующего агента, служит мерой содержания определяемого вещества в реакционной среде. Количество электричества определяется как произведение измеряемого тока на время генерации до точки эквивалентности.

Кулонометрический метод анализа обладает высокой чувствительностью и широким динамическим диапазоном. Современные кулонометрические анализаторы имеют сравнительно простое устройство, небольшие габариты и массу, сравнительно низкую стоимость. К недостаткам кулонометрических приборов можно отнести низкую селективность и необходимость периодической смены электролита. Примером кулонометрического прибора являются газоанализаторы ГКП-1 и «Атмосфера-1», служа-

щие для определения не только SO_2 , но и H_2S , O_3 , Cl_2 на уровне ПДК и ниже.

Например, определение SO_2 и H_2S может основываться на их поглощении растворами I_2 в H_2SO_4 и последующем анодном электроокислении образующихся йодид-ионов на измерительном электроде:



Таким образом, если измерить количество электричества, затраченного на реакцию (б), то можно определить количество поглощенного абсорбирующим раствором SO_2 (а).

Определение O_3 и Cl_2 может быть основано на следующих реакциях, первая из которых происходит в абсорбирующем растворе и является окислительно-восстановительной реакцией, дающей молекулярный йод. Вторая — электрохимическая реакция катодного восстановления йода до йодид-иона.



Оптические методы анализа включают в себя в основном абсорбционные и эмиссионные методы.

Абсорбционные методы анализа основаны на способности веществ избирательно поглощать лучистую энергию в характерных участках спектрального диапазона.

В свою очередь, абсорбционные методы делят на недисперсионные и дисперсионные.

При *недисперсионном методе* анализа не осуществляется разложение излучения по длинам волн, т. е. выделяют нужную спектральную область без разложения в спектр. Для такого выделения чаще всего используют газовые фильтры.

Дисперсионный метод основан на выделении нужной спектральной области путем разложения излучения в спектр. Существует множество вариантов построения газоанализаторов: однолучевые, многолучевые, одноканальные, многоканальные и т. д. В качестве дисперсионного элемента, разлагающего излучение в спектр, можно использовать призмы, решетки и интерферометры. Метод является в настоящее время одним из высокочувстви-

тельных, однако приборы, работающие на основе этого метода, пока существенно дороже и сложнее недисперсионных.

Среди недисперсионных газоанализаторов, работающих на принципе поглощения электромагнитного излучения, в практике широкое распространение получили оптико-акустические приборы. В реализации такой принцип получил название **оптико-акустического эффекта**. Примерами последних могут являться инфракрасный оптико-акустический газоанализатор ГИАМ-14, предназначенный для измерения концентраций CO , SO_2 , CH_4 в газовых потоках; стационарный автоматический непрерывно действующий оптико-акустический газоанализатор ИФАН-М, предназначенный для измерения концентрации оксида углерода (CO) в сложной газовой смеси.

Оптико-акустический эффект весьма перспективен также для определения многочисленных органических ЗВ, поскольку они способны поглощать инфракрасное излучение, модулированное звуковой частотой. В результате такого поглощения их молекулы начинают испускать «звук» на частоте модуляции. Механизм испускания звука состоит в том, что газ в рабочей кювете разогревается под действием поглощаемого инфракрасного излучения и его давление начинает колебаться с частотой модуляции (звука). Измеряя интенсивность этого звука детекторами микрофонного типа, удается определить концентрацию вещества, поглотившего инфракрасное излучение. Зная частоту последнего, можно установить тип вещества.

Примером газоанализатора, основанного на резонансном поглощении света, является прибор ИКРП-450У, предназначенный для определения ртутных паров в воздухе (например, рабочих зон). Излучаемый на длине волны 254 нм ртутной лампой ультрафиолетовый свет модулируется и пропускается через проточную газовую кювету. При наличии ртутных паров, резонансно поглощающих свет на той же длине волны, проходящий свет резко ослабляется, и степень этого ослабления служит мерой концентрации ртути. Модуляция упрощает регистрацию проходящего сигнала и уменьшает приборный шум, что положительно влияет на снижение предела обнаружения и уменьшает погрешности.

Основным преимуществом оптико-акустического метода газового анализа является его высокая чувствительность, которая в реальных конструкциях дополняется высокими качествами современных методов и устройств для регистрации акустических сигналов — микрофонов, усилителей и специальной техники.

Среди абсорбционных методов в отдельную группу выделяют лазерные методы. Их перспективность обусловлена специфическими особенностями лазерного излучения — монохроматичностью, высокой энергетической плотностью, направленностью и др. При этом анализируется поглощение не во всей полосе, а на отдельной линии поглощения, что значительно повышает избирательность и чувствительность газового анализа. Принцип лазерного контроля состоит в следующем: лазерный луч, проходя через газовую среду, взаимодействует с ней, оставляя за собой «след» возбужденных молекул, излучающих свет обычно на более низкой частоте, чем частота лазерного света (флуоресценция) или на частоте лазерного света (резонансная флуоресценция). Кроме того, свет может упруго (т. е. без изменения частоты) рассеивать свою энергию на крупных частицах (релеевское и ми-рассеяние). Интенсивность проходящего луча может ослабляться и вследствие неупругих взаимодействий, например, при поглощении квантов света молекулами (абсорбционная спектроскопия). Свет может возбуждать колебательные движения внутри молекул, а поглощенная энергия (инфракрасный диапазон) может снова переизлучаться. Явление называется **комбинационным рассеянием (КР)**. Спектроскопия комбинационного рассеяния называется также рамановской, хотя сам эффект такого рассеяния известен как эффект Рамана — Манделъштама — Ландсберга.

Спектроскопия КР основана на том, что наряду с возбуждающей световой частотой ν_0 , в рассеянном свете присутствуют еще две частоты $\nu_0 + \nu_S$ и $\nu_0 - \nu_S$, где ν_S — частота колебательных переходов в детектируемых молекулах. Другими словами, рассеянный упруго световой поток оказывается модулированным стоксовской ($\nu_0 - \nu_S$) и антистоксовской ($\nu_0 + \nu_S$) частотами, выделяя которые получают информацию о концентрации и типе молекул ЗВ. Поскольку интенсивность стоксовской линии, а тем более линии запрещенного антистоксовского перехода, составляют лишь очень незначительную долю от основной линии упругого релеевского рассеяния, то КР-спектроскопия получила распространение только после создания мощных лазеров с перестраиваемой частотой.

На базе всех этих явлений созданы перспективные приборы для дистанционного определения ЗВ.

Фотоколориметрические методы анализа — одна из широко используемых разновидностей абсорбционного оптического

анализа. Принцип действия фотоколориметрических газоанализаторов основан на измерении интенсивности окраски цветного соединения, образующегося при взаимодействии измеряемого компонента со вспомогательным реагентом. В зависимости от среды, где происходит реакция, фотоколориметры делят на кюветные и ленточные. Примером первых являются газоанализаторы серии ФК, например, прибор ФК-5601, предназначенный для определения H_2S , SO_2 , NO_x , O_3 , HF . Чувствительность фотоколориметров может быть очень высокой, особенно при использовании метода накопления анализируемого вещества в растворе или на ленте. Ленточные газоанализаторы серии ФЛ, например ФЛ-5501, позволяют определять NO_2 , NH_3 , O_3 , SO_2 , H_2S , Cl_2 . Существенными недостатками ленточных фотоколориметров являются большая погрешность, вызванная неравномерностью протяжки ленты и ее старением, а также сильная зависимость от показаний температуры. В жидкостных фотоколориметрах анализируемую газовую смесь барботируют через раствор вспомогательного реагента. Интенсивность окраски, пропорциональная концентрации измеряемого компонента, измеряется фильтровым фотометром. Фотометрические приборы имеют высокую чувствительность; подбором соответствующих реагентов можно добиться хорошей селективности, однако точность и избирательность этих приборов достигаются путем их значительного усложнения. Примером может служить фотоколориметрический газоанализатор 305ФА-01, предназначенный для определения концентраций CO , NO , NO_2 , SO_2 , NH_3 в отходящих газах промышленных предприятий.

Эмиссионные методы анализа основаны на измерении интенсивности излучения анализируемой газовой смеси. Для анализа используют как спектры теплового излучения, так и молекулярную люминесценцию. Сущность метода состоит в том, что исследуемые молекулы тем или иным способом приводят в состояние оптического возбуждения и затем регистрируют интенсивность люминесценции или флуоресценции, заключающихся в испускании возбужденными молекулами квантов света при возвращении молекул в основное состояние. При люминесценции возбуждение атомов или молекул осуществляется при нормальной температуре (в состоянии теплового равновесия) в результате химических реакций (хемилюминесценция), протекания тока (электролюминесценция) или поглощения световой энергии (флуоресценция).

Хемилюминесцентный метод в настоящее время является одним из основных эмиссионных методов измерения, используемых при контроле оксидов азота. В хемилюминесцентных приборах используется эффект появления собственного оптического излучения от материала датчика при воздействии на него анализируемого газа. Если, например, в газовую смесь, содержащую окись азота, добавить озон, то происходит химическая реакция, сопровождающаяся собственным свечением:



В реальных приборах такая реакция реализуется созданием озона в пробе воздуха специальным генератором озона. Озон, вступая в реакцию с окислами азота, заставляет смесь испускать свет, который и регистрируется фотометром.

Хемилюминесцентный метод может быть реализован и в ряде других химических реакций с выделением энергии в виде световой энергии. На практике нашла применение, например, экзотермическая реакция взаимодействия озона с этиленом:



Пламенно-ионизационный метод применяют при контроле углеводородов. Он основан на измерении изменения тока ионизации, полученного при введении в пламя водорода органических веществ. В отсутствие органических примесей ток ионизации, возникающий в чистом водородном пламени, ничтожно мал. Молекулы органических веществ, вводимые в пламя, легко ионизируются, в результате чего электропроводность пламени резко возрастает. Если такое пламя поместить между электродами, к которым приложено постоянное напряжение, то между ними появится ионизационный ток, который усиливается и подается на регистрирующий прибор. Пламенно-ионизационный метод обладает высокой чувствительностью к органическим веществам, линейной характеристикой преобразования, нечувствительностью к большинству примесей неорганического происхождения. Для определения концентрации суммы углеводородов в выбросах промышленных предприятий применяют газоанализаторы 334КПИ-03 либо 323ИН-02.

Выше были рассмотрены средства САС. Вместе с тем, развитие систем мониторинга и многообразие задач аналитического контроля требуют более универсальных приборов, т. е. средств

УЛАС, включающих хроматографы, хромато-масс-спектрометры, атомно-абсорбционные спектрометры и эмиссионные спектрометры индукционно-связанной плазмы. Последние два типа приборов используются также при анализе волных сред, почв и биоты, поскольку по своему принципу действия они предназначены для определения неорганических веществ с ионным типом связей. Такие вещества не обладают летучестью и не образуют гомогенного загрязнения воздушной среды. Они могут присутствовать в ней только как собственные аэрозоли или псевдоаэрозоли, т. е. как вещества, адсорбированные на посторонних коллоидных частицах или на более крупных частицах пыли. Проблема аэрозольного и пылевого загрязнения исключительно важна, особенно для регионов с развитой металлургической промышленностью и промышленностью стройматериалов (производство цементного клинкера).

Анализ атмосферного воздуха на присутствие ионных веществ — прежде всего вопрос улавливания и сортировки по размерам твердых частиц.

Рассмотрим подробнее хроматографические методы анализа. Их относят к *гибридным* или *комбинированным*. Последнее означает, что методы основаны на комбинировании, как минимум, двух разнородных принципов — предварительного разделения смеси веществ, обычно присутствующих в атмосферном воздухе, и последующего детектирования (определения) каждого из них по очереди. Таким образом, хроматограф всегда состоит из двух блоков — разделения и детектирования. Чем четче произведено разделение веществ, тем мягче требования к селективности детектора. Все известные детекторы делят на универсальные (абсолютно неселективные) и селективные. Степень селективности может быть разной. По-видимому, наибольшей селективностью как детектор обладает **масс-спектрометр**.

Таким образом, комбинирование как можно более селективного разделения с наиболее селективным детектором — масс-спектрометром привело к созданию целого класса новых приборов, обладающих рекордной чувствительностью, очень низкими пределами обнаружения, высокой разрешающей способностью и правильностью аналитических определений. Этот класс приборов известен как **хромато-масс-спектрометры (ХМС)**. Именно с их использованием стал возможен анализ суперэкоотоксичных веществ — диоксинов и диоксинпроизводящих веществ — ПХБ, обладающих сложным гомологическим и изомерным составом.

Именно с внедрением в аналитическую практику ХМС-методов оказалось возможным определять наиболее токсичные изомеры на фоне гораздо менее токсичных.

В соответствии с тремя типами систем и существующих в них распределений: газ — твердое, жидкость — твердое (адсорбция), газ — жидкость (абсорбция) и жидкость—жидкость (экстракция) известно и несколько типов хроматографов. Явление адсорбции играет наиболее важную роль в так называемом ионном хроматографе. Явление абсорбции играет важно и в газовой хроматографии (ГХ/GC — gas chromatography). Явление экстракции играет основную роль в жидкость-жидкостной хроматографии, называемой просто жидкостной хроматографией (ЖХ/LC — liquid chromatography). Развитие последней привело к созданию так называемой высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ/HPLC — high performance liquid chromatography).

Какому бы физико-химическому распределению ни отвечала хроматография, технически она всегда реализуется в соответствующем приборе так, что существует неподвижная фаза — твердое тело или твердое тело, пропитанное (смоченное) жидкой фазой. Относительно этой неподвижной фазы перемещается подвижная фаза — газ или жидкость. В том случае если газ движется относительно смоченного твердого тела (насадки или смоченных стенок капилляра), реализуется метод ГХ/GC. Если органическая фаза движется относительно водной фазы, закрепленной на пористом носителе (насадочная колонка) или на стенках (капиллярная колонка), то реализуется жидкостная хроматография (ЖХ/LC).

Метод ГХ/GC проводится при повышенной температуре. Это необходимо для придания примеси некоторой летучести, без чего невозможно ее движение вдоль колонки. Максимальная температура в термостате ГХ — 350 °С. Это ограничивает применение ГХ анализом веществ, обладающих заметной при этой температуре летучестью. Поэтому ионные вещества и высокомолекулярные органические не определяются методом ГХ.

Жидкостная экстракция (ЖХ и ВЭЖХ) проводится при комнатной температуре и может поэтому служить для целей разделения даже неорганических веществ и веществ с крайне низким парциальным давлением собственных паров.

Используемые для идентификации газохроматографические детекторы могут быть универсальными, селективными или спе-

цифическими. Характеристики газохроматографических детекторов приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5. Характеристики основных газохроматографических детекторов

Обозначение	Название/тип	Селективность	Минимально детектируемое количество	Линейный диапазон
ПИД	Пламенно-ионизационный/универсальный	—	10 пгС/с	10 ⁷
ЭЗД	Электронозахватный/селективный	Соединения, содержащие атомы галогенов	0,2 пгCl/с	10 ⁴
ТИД	Термоионный/селективный	Азот- и фосфорсодержащие соединения	1 пг N/с, 5 пгP/с	10 ⁴
ФИД	Фотоионизационный/селективный	Ароматические углеводороды		10 ⁷
ЭЛКД	Электролитический кондуктометрический/селективный	Соединения, содержащие атомы галогенов, серы и азота	1 пг Cl/с, 5 пг S/с	10 ⁶ 10 ⁴
МС	Масс-селективный/универсальный	Характеристические ионы	1 нг в режиме сканирования, 1 пг в режиме массфрагментографии	10 ⁵
АЭД	Атомноэмиссионный/универсальный	Любые вещества	0,2—50 пг/с в зависимости от элемента	10 ⁴
ИКС	ИК-спектрометрический/универсальный	Любые вещества, имеющие в ИК-спектре сильные полосы поглощения	1 нг	10 ³

К основным отечественным газовым хроматографам относятся «Цвет-800», «КристаллЛюкс 4000», использование которых возможно с различными детекторами.

В отличие от газовой хроматографии, в жидкостной хроматографии используют гораздо меньше детекторов, которые можно подразделить на такие, как:

- оптические;
- электрические;
- электрохимические.

Выбирая метод хроматографического определения из двух наиболее используемых в экоаналитике, следует иметь в виду, что ЖХ и ВЭЖХ применяются в тех случаях, когда летучесть веществ мала, а их полярность велика. Наоборот, ГХ используют

при достаточно высокой летучести веществ и низкой полярности, что обеспечивает не слишком большое время удержания в разделительной колонке и, следовательно, приемлемое время анализа. Вместе с тем имеются области летучести и полярности веществ, при которых возможно применение и газовой, и жидкостной хроматографии.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое контактные и дистанционные измерения?
2. Какие измерения можно проводить с помощью ЛИДАРА?
3. Каковы различия между дифференциальными и интегральными измерениями?
4. Какие приборы входят в состав комплексов САС и УЛАС?
5. Какими газоанализаторами снабжены «ПОСТ-1» и «ПОСТ-2»?
6. Качество какой среды отражает мониторинг снежного покрова?
7. Что такое мониторинг трансграничного переноса?
8. Что такое биоиндикация и биотестирование?
9. Приведите примеры использования растений в качестве биоиндикаторов загрязнения атмосферы.
10. Назовите основные цели аэрокосмического мониторинга.
11. Назовите основные электрохимические методы, используемые в контроле качества атмосферы.
12. Какие газы могут быть измерены оптико-акустическим методом?
13. Какие газовые примеси могут быть измерены с помощью хемилюминесцентного газоанализатора?
14. Какие примеси могут быть измерены газоанализатором с ионизационно-пламенным детектором?

6. ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ЗА ЗАГРЯЗНЕНИЕМ ВОЗДУХА

Отбор проб

В настоящее время отбор проб воздуха регламентирован несколькими нормативными документами.

Для селитебных территорий это — ГОСТ 17.2.3.01—86 «Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов», где установлены три категории постов наблюдений (стационарный, маршрутный, передвижной), размещение и количество постов наблюдений, четыре вида программ наблюдений на стационарных постах (полная, неполная, сокращенная, суточная) и продолжительность отбора проб при определении разовых концентраций (20—30 мин) и при определении среднесуточных концентраций.

Также используют ГОСТ 17.2.6.01—86 «Охрана природы. Атмосфера. Приборы для отбора проб воздуха населенных пунктов. Общие технические требования».

На опорных стационарных постах проводятся наблюдения за содержанием пыли, SO₂, CO, NO₂ (основные загрязняющие вещества) и за специфическими веществами, которые характерны для промышленных выбросов данного населенного пункта.

На стационарных неопорных постах наблюдают за специфическими загрязняющими веществами (ЗВ).

Перечень веществ для контроля на каждом стационарном посту в городе устанавливают органы Роскомгидромета и санитарно-эпидемиологической службы.

На маршрутных постах проводятся наблюдения за основными ЗВ и специфическими веществами, характерными для промышленных выбросов данного населенного пункта.

На передвижных (подфакельных) постах проводятся наблюдения за специфическими ЗВ, характерными для выбросов конкретного предприятия.

Организация и проведение наблюдений за загрязнением атмосферы в городах, на региональном и фоновом уровнях на территории Российской Федерации регламентирована РД 52.04.186—89 «Руководство по контролю загрязнения атмосферы», где также описано размещение и количество постов наблюдений, программы и сроки наблюдений.

При наблюдениях используют следующие режимы отбора проб:

- разовый (20—30 мин);
- дискретный (в один поглощающий прибор или на фильтр через равные промежутки времени в течение суток отбирают 3—8 разовых проб в течение 20—30 мин);
- суточный (отбор производится непрерывно в течение суток).

При контроле концентраций веществ в воздухе рабочей зоны ориентируются на ГОСТ 12.1.005—88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».

Содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны подлежит систематическому контролю для предупреждения возможности превышения предельно допустимых концентраций — максимальных разовых рабочей зоны (ПДК_{мр.рз.}) и среднесменных рабочей зоны (ПДК_{сс.рз.}).

При одновременном содержании в воздухе рабочей зоны нескольких вредных веществ одностороннего действия (по заключению органов государственного санитарного надзора) отношения фактических концентраций каждого из них в воздухе к их ПДК не должна превышать единицы:

$$\frac{C_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{C_2}{\text{ПДК}_2} + \dots + \frac{C_n}{\text{ПДК}_n} \leq 1. \quad (6.1)$$

Отбор проб должен производиться в зоне дыхания при характерных производственных условиях.

Для каждого производственного участка должны быть определены вещества, которые могут выделяться в воздух рабочей зоны. При наличии в воздухе нескольких вредных веществ контроль воздушной среды допускается проводить по наиболее опасным и характерным веществам, устанавливаемым органами государственного санитарного надзора.

При контроле соблюдения *максимальной разовой ПДК* определение содержания вредных веществ в воздухе производится на наиболее характерных рабочих местах. При наличии идентичного оборудования или выполнении одинаковых операций контроль производится выборочно на отдельных рабочих местах, расположенных в центре и по периферии помещения.

Содержание вредного вещества в данной конкретной точке характеризуется следующим суммарным временем отбора: для токсических веществ — 15 мин, для веществ преимущественно фиброгенного действия — 30 мин. За указанный период времени может быть отобрана одна или несколько последовательных проб через равные промежутки времени. Результаты, полученные при однократном отборе или при усреднении последовательно отобранных проб, сравнивают с величинами ПДК_{мр.рз}.

В течение смены и (или) на отдельных этапах технологического процесса в одной точке должно быть последовательно отобрано не менее трех проб. Для аэрозолей преимущественно фиброгенного действия допустим отбор одной пробы.

При возможном поступлении в воздух рабочей зоны вредных веществ с остронаправленным механизмом действия должен быть обеспечен непрерывный контроль с сигнализацией о превышении ПДК.

Периодичность контроля устанавливается в зависимости от класса опасности вредного вещества: для 1 класса — не реже одного раза в 10 дней, 2 класса — не реже одного раза в месяц, 3 и 4 классов — не реже одного раза в квартал.

В зависимости от конкретных условий производства периодичность контроля может быть изменена по согласованию с органами государственного санитарного надзора. При установленном соответствии содержания вредных веществ 3 и 4 классов опасности уровню ПДК допускается проводить контроль не реже одного раза в год.

При контроле за соблюдением *среднесменных ПДК* определяют концентрации веществ, для которых установлен норматив — ПДК_{сс.рз}. Измерение проводят приборами индивидуального контроля либо по результатам отдельных измерений. В последнем случае ее рассчитывают как величину, средневзвешенную во времени, с учетом пребывания работающего на всех (в том числе и вне контакта с контролируемым веществом) стадиях и операциях технологического процесса. Обследование осуществляется

на протяжении не менее чем 75 % продолжительности смены в течение не менее трех смен. Расчет проводится по формуле

$$K_{cc} = \frac{K_1 t_1 + K_2 t_2 + \dots + K_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}, \quad (6.2)$$

где K_{cc} — среднесменная концентрация, мг/м³; K_1, K_2, \dots, K_n — средние арифметические величины отдельных измерений концентраций вредного вещества на отдельных стадиях (операциях) технологического процесса, мг/м³; t_1, t_2, \dots, t_n — продолжительность отдельных стадий (операций) технологического процесса, мин.

Периодичность контроля за соблюдением среднесменной ПДК должна быть не реже кратности проведения периодических медицинских осмотров, установленной Минздравом РФ.

Методики и средства должны обеспечивать избирательное измерение концентрации вредного вещества в присутствии сопутствующих компонентов на уровне $\leq 0,5$ ПДК.

Контролируемые показатели

В выбросах предприятий, согласно ОНД—90 «Руководство по контролю источников загрязнения атмосферы», контролю подлежат вещества следующих групп:

1. Основных (СО, SO₂, NO_x, пыль).
2. Веществ первой категории опасности (при отсутствии таких веществ перечень формируется на основе веществ второй категории).
3. Веществ, выбросы которых создают загрязнение атмосферного воздуха за пределами санитарно-защитной зоны более пяти ПДК.

На основе данных, содержащихся в нормативах ПДВ и государственности, отбирают источники, суммарные выбросы которых по отобранным веществам составляют 90 % для предприятий первой категории опасности, и 70 % — для предприятий второй категории.

В табл. 6.1 приведены данные по промышленным загрязнениям, связанным с различными видами производства.

В число источников, подлежащих контролю, могут входить и другие, если:

- эксплуатация технологических установок, агрегатов, пыле-, газоочистных установок производится в неоптимальном

Таблица 6.1. Типичные загрязняющие вещества в выбросах предприятий

Промышленная установка/производство	Загрязняющие вещества в выбросах
Сталеплавильные комбинаты	Пыль, дым, СО, фтористые соединения
Стеклоплавильные заводы	Оксиды серы, пыль, различные металлы
Нефтеперерабатывающие заводы	Соединения серы, углеводороды, дым, пыль
Производство серной кислоты	SO ₂ , SO ₃ , туман серной кислоты
Литейное производство серого чугуна и стали	Пыль, дым
Машиностроительные заводы	Пыль, NH ₃
Целлюлозно-бумажные комбинаты	Соединения серы, пыль
Производство соляной кислоты	Туман HCl и газ
Производство азотной кислоты	Оксиды азота
Производство каустической соды и хлора	Cl ₂
Производство минеральных удобрений	Фтористые соединения, пыль, NH ₃

режиме или при несоблюдении технологических регламентов, условий производства;

- во время проверки имеются технологические залповые выбросы;
- в результате предыдущих проверок установлены превышения ПДК;
- наблюдается повышенная загрязненность атмосферного воздуха селитебной зоны.

Содержание ЗВ нормируется следующими документами.

Окружающая атмосфера:

- ГН 2.1.6.1338—03;
- ГН 2.1.6.1339—03.

Атмосфера рабочей зоны:

- ГН 2.2.5.1313—03;
- ГН 2.2.5.1314—03.

Источники выбросов — линейный, передвижной, плоский промышленный, стационарный, точечный:

- ГОСТ 17.2.1.01—76 (классификация);
- ОНД-86, ОНД-90.

Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.1338—03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест» распространяются на атмосферный воздух городских и сельских поселений. Используются при про-

ектировании технологических процессов, оборудования и вентиляции, для санитарной охраны атмосферного воздуха, для профилактики неблагоприятного воздействия загрязняющих атмосферный воздух веществ на здоровье населения городских и сельских поселений.

При совместном присутствии в атмосферном воздухе нескольких веществ, обладающих суммацией действия, сумма их концентраций не должна превышать единицы при расчете по формуле:

$$\sum \frac{c_n}{\text{ПДК}_n} \leq 1, \quad (6.3)$$

где c_n — фактическая концентрация n -го вещества в атмосферном воздухе; ПДК _{n} — предельно допустимая концентрация того же вещества.

Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.1339—03 «Ориентировочные безопасные уровни воздействия (ОБУВ) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест» устанавливаются сроком на три года и распространяются на атмосферный воздух населенных мест городских и сельских поселений. Используются при решении вопросов предупредительного надзора, для обоснования требований к разработке оздоровительных мероприятий по охране атмосферного воздуха проектируемых, реконструируемых и опытных малотоннажных производств.

В соответствии с классификацией ГОСТ 12.1.007—76. «ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности» вещества разделены на четыре класса опасности (табл. 6.2):

- 1 класс — чрезвычайно опасные;
- 2 класс — высокоопасные;
- 3 класс — опасные;
- 4 класс — умеренно опасные.

Гигиенические нормативы ГН 2.2.5.1313—03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны» распространяются на рабочие места, независимо от их расположения (в производственных помещениях, в горных выработках, на открытых площадках, транспортных средствах и т. п.), используются при проектировании производственных зданий, технологических процессов, оборудования и вентиляции, для обеспечения производственного контроля за качеством

Таблица 6.2. Классы опасности вредных веществ

Наименование показателя	Норма для класса опасности			
	1-го	2-го	3-го	4-го
ПДК вредных веществ в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	<0,1	0,1—1,0	1,1—10,0	>10,0
Средняя смертельная доза при введении в желудок, мг/кг	<15	15—150	151—5000	>5000
Средняя смертельная доза при нанесении на кожу, мг/кг	<100	100—500	501—2500	>2500
Средняя смертельная концентрация в воздухе, мг/м ³	<500	500—5000	5001—50 000	>50000
Коэффициент возможности ингаляционного отравления (КВИО)	>300	300—30	29—3	<3
Зона острого действия	<6,0	6,0—18,0	18,1—54,0	>54,0
Зона хронического действия	>10,0	10,0—5,0	4,9—2,5	<2,5

производственной среды и профилактики неблагоприятного воздействия на здоровье работающих вредных химических веществ.

Гигиенические нормативы ГН 2.2.5.1314—03 «Ориентировочные безопасные уровни воздействия (ОБУВ) вредных веществ в воздухе рабочей зоны» являются временными, устанавливаются сроком на три года и распространяются на рабочие места. Их используют при проектировании производственных зданий, технологических процессов, оборудования и вентиляции, для контроля за качеством производственной среды и профилактики неблагоприятного воздействия на здоровье работающих.

Заключение

Противоречия и недостатки общегосударственной системы мониторинга обусловлены следующим:

- неопределенностью понятий предельно допустимая экологическая нагрузка (ПДЭН) и «приемлемое качество среды» при продолжающемся росте разнообразия загрязняющих веществ;
- стремлением измерить все большее число параметров, приводящим к «синдрому избытка данных — недостатка информации» и чрезмерному удорожанию систем мониторинга;
- негибкостью сети, излишней жесткостью программ при изменяющейся хозяйственной деятельности;
- нарушением принципов выбора мест для постов контроля (их часто располагают из соображения удобства);
- недостаточной взаимосвязанностью дистанционных и контактных методов получения информации;
- недостаточным согласованием информации, полученной физико-химическими и биологическими методами;
- большим числом анализов, выполняемых вручную;
- запаздыванием информации и ограниченным доступом к ней заинтересованных организаций и лиц;
- ручной систематизацией и обработкой данных, приводящей к непроизводительным затратам времени.

Следовательно, существующая система мониторинга должна подвергнуться существенной модернизации, при этом следует исходить из перечисленных ниже моментов:

- 1) признания необходимости сохранения централизованной системы наблюдения и контроля за окружающей средой и средой обитания;
- 2) понимания важности стыковки результатов измерений в импактных зонах с измерениями выбросов на предприятиях (сегодня эти измерения часто расходятся на порядок величины);
- 3) необходимости усиления на данном этапе внимания к проблемам импактного уровня мониторинга.

При этом потребуются:

- иерархизация географических зон страны по степени неотложности принятия мер оздоровления экологической обстановки и последовательное решение назревших проблем, начиная с районов с наиболее тяжелой экологической ситуацией;
- осуществление тесного взаимодействия различных методов и систем наблюдения с использованием принципов взаимодополнения и интеркалибровки;
- более широкое внедрение в практику мониторинга принципов геоинформационных систем (ГИС/GIS), которые уже много лет эффективно используются в других странах;
- разработка новых методик и приборов (особенно для фоновых измерений);
- широкое распространение простейших приборов и средств получения экспресс-информации, дешевых и потому доступных для широкого использования в рекогносцировочных измерениях.

Сложная экологическая ситуация в местах обитания человека требует особого внимания к разработке принципов импактного и регионального мониторинга. При постоянно изменяющейся структуре производства система мониторинга также должна стать гибкой, использующей перестраивающиеся программы и оптимальное соотношение передвижных и стационарных постов. Но важнее всего добиться того, чтобы стало возможным осуществление **активного** мониторинга. Созданная в стране система мониторинга сыграла свою положительную роль, и теперь от нее требуется большее, чем пассивное наблюдение, оценка и прогноз. Необходимо дополнить ее системой принятия решений, т. е. экспертной компьютеризированной службой, которая не может существовать без создания единой геоинформационной системы, охватывающей всю страну.

Понятно, что решения, направленные на улучшение функционирования предприятий, должны приниматься на основании мониторинга источников и анализа ситуации в непосредственной близости к ним, т. е. в импактных зонах. Там и должно располагаться основное количество измерительной аппаратуры, причем основное внимание должно быть уделено методам быстрой регистрации загрязняющих веществ в пространстве и времени.

В системе сбора информации более существенная роль должна принадлежать станциям дистанционного наблюдения и

мобильным лабораториям. Последние следует оснастить приборами для экспресс-анализа, средствами пробоотбора и консервации проб. Эти лаборатории могут сыграть важную роль в анализе послеаварийных ситуаций, изучении районов экологического бедствия. Мобильные лаборатории, оснащенные дистанционными приборами регистрации нормируемых примесей в воздухе над предприятиями, а также для дистанционного определения концентраций загрязняющих веществ над организованными источниками (в факелах труб), помогут стыковать данные мониторинга источников с мониторингом импактных зон.

Важно, чтобы информация, полученная с помощью систем экологического мониторинга, предоставлялась совместно с географической информацией и данными медицинского мониторинга. Это позволяет проследить за характером распределения загрязняющих веществ в пространстве и времени в связи с географическими и ландшафтными особенностями рассматриваемых участков Земли. Кроме того, подобный способ представления информации позволит решить основную задачу уменьшения негативного влияния загрязнения атмосферного воздуха на здоровье людей.

Наконец, информация о состоянии окружающей среды, наблюдаемых изменениях, тенденциях этих изменений, прогнозе вероятных ситуаций должна быть доступной для всех заинтересованных предприятий, организаций, органов управления, средств массовой информации и общественности. Пользователями информационной системы могут быть любые предприятия и организации на территории страны и за рубежом, работающие над проблемами антропогенного воздействия на среду, использования природных ресурсов, здоровья населения, образования в области охраны окружающей среды. Доступность достоверной информации будет способствовать экологическому образованию населения, уменьшению количества ложных сенсационных сообщений в средствах массовой информации и привлечению заинтересованных организаций к широкому сотрудничеству.

Литература

1. Бераянд М. Е. «Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы» Л.: Гидрометеоздат, 1985. 271 с.
2. Проблемы экологии России / под ред. В. И. Данилова-Данильяна, В. М. Котлякова. М., 1993. 347 с.
3. Эльтерман В. М. Охрана воздушной среды на химических и нефтехимических предприятиях. М.: Химия, 1985. 159 с.
4. Исидоров В. А. Органическая химия атмосферы. Л.: Химия, 1985. 264 с.
5. Бримблкумб П. Состав и химия атмосферы. М.: Мир, 1988. 352 с.
6. Руководство по контролю загрязнения атмосферы РД 52.04.186—89. М., 1991. 693 с.
7. Руководство по контролю источников загрязнения атмосферы ОНД-90. СПб., 1992. Ч. 1. 98 с.; Ч. 2. 102 с.
8. Загрязнение воздуха и жизнь растений / под ред. М. Трешоу. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 534 с.
9. Моделирование в экологическом мониторинге: учеб. пособие. М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. 35 с.
10. Козлов М. Г. «Метрология и стандартизация: учебник. М., СПб.: Изд-во «Петербургский ин-т печати», 2001. 372 с.

Оглавление

Введение	3
1. Состав атмосферного воздуха и показатели качества воздушной среды	5
2. Метеорологические условия и распространение загрязняющих веществ	16
3. Методы прогнозирования загрязнения воздушной среды	36
4. Системы мониторинга	51
5. Принципы и средств измерений в мониторинге атмосферного воздуха	82
6. Организация контроля за загрязнением воздуха	116
Заключение	123
Литература	126

**Тарсов Валерий Васильевич
Тихонова Ирина Олеговна
Кручинина Наталия Евгеньевна**

Мониторинг атмосферного воздуха

Учебное пособие

Редактор *М. А. Кутепова*
Корректор *О. Н. Картамышева*
Компьютерная верстка *И. В. Кондратьевой*
Оформление серии *А. Н. Никулиной*

Сдано в набор 15.10.2007. Подписано в печать 25.10.2007. Формат 60×90/16.
Печать офсетная. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 8,0. Уч.-изд. л. 8,4.
Бумага офсетная. Тираж 2000 экз. Заказ № 1636.

Издательство «ФОРУМ»
101000, Москва — Центр, Колпачный пер., д. 9а
Тел./факс: (495) 625-32-07, 625-52-43
E-mail: mail@forum-books.ru

ЛР № 070824 от 21.01.93
Издательский Дом «ИНФРА-М»
127282, Москва, ул. Полярная, д. 31в
Тел.: (495) 380-05-40
Факс: (495) 363-92-12
E-mail: books@infra-m.ru
Http://www.infra-m.ru

По вопросам приобретения книг обращайтесь:

Отдел продаж «ИНФРА-М»
127282, Москва, ул. Полярная, д. 31в
Тел.: (495) 363-42-60
Факс: (495) 363-92-12
E-mail: books@infra-m.ru

Центр комплектования библиотек
119019, Москва, ул. Моховая, д. 16
(Российская государственная библиотека, кор. К)
Тел.: (495) 202-93-15

Магазин «Библиосфера» (розничная продажа)
109147, Москва, ул. Марксистская, д. 9
Тел.: (495) 670-52-18, (495) 670-52-19

Отпечатано в ОАО «Домодедовская типография»,
г. Домодедово, Каширское ш., д. 4, корп. 1.

Тихонова Ирина Олеговна — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной экологии РХТУ им. Д.И. Менделеева, специалист в области экологического мониторинга и контроля. Награждена медалью Е. Дашковой (РАЕН) за работы в области охраны окружающей среды.

Тарасов Валерий Васильевич — доктор химических наук, профессор кафедры промышленной экологии РХТУ им. Д.И. Менделеева, специалист в области экологического мониторинга и экстракционных процессов. Лауреат премии им. Д.И. Менделеева, лауреат премии Совета Министров СССР, лауреат премии Президента РФ в области образования.

Кручинина Наталия Евгеньевна — доктор технических наук, профессор кафедры промышленной экологии РХТУ им. Д.И. Менделеева. Лауреат премии Президента РФ в области образования, почетный работник высшего профессионального образования.

ISBN 978-5-91134-189-3



9 785911 341893