

Государственное учреждение
"Главная геофизическая обсерватория им. А.И.Воейкова"

на правах рукописи

УДК 551.510.04

Филатов

Филатова Елена Николаевна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ
ПО ОПЕРАТИВНЫМ ДАННЫМ**

Специальность 25.00.30 - метеорология,
климатология, агрометеорология

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук

Санкт – Петербург

2005

Диссертация выполнена в Государственном учреждении "Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова"

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Е.Л. Генихович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор И.Л. Кароль

кандидат географических наук
Н.С. Буренин

Ведущая организация: Российский государственный
гидрометеорологический университет

Защита диссертации состоится "30" ноября 2005 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д327.005.01 при Государственном учреждении "Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова" по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного учреждения "Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова"

Автореферат разослан "26" октября 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета,
доктор географических наук

А. Вещер

А.В. Мещерская

2006-4
20837

3 2203876

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

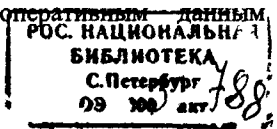
Разработка моделей атмосферной диффузии, используемых для решения широкого круга прикладных задач, в том числе, связанных с подготовкой природоохранных мероприятий, регулированием транспортных потоков в городах, оценкой риска для здоровья населения и др., имеет большое научное и практическое значение. Такое моделирование основано на учете закономерностей распространения атмосферных примесей.

В течение ряда лет одним из наиболее важных направлений работ Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова было построение моделей, обеспечивающих расчет максимальных значений концентраций загрязняющих веществ (соответствующих верхним процентилям функции распределения вероятностей концентрации), так как при проектировании и сооружении новых предприятий, а также реконструкции действующих предприятий требуется, чтобы именно максимальные приземные концентрации примеси не превышали соответствующие предельно допустимые значения - ПДК. Результатом этих работ явилось создание нормативных документов по расчету полей максимальных концентраций, которые широко используется в практической деятельности в области охраны воздушного бассейна от загрязнения, ведущейся в России и других странах СНГ.

В то же время, известен ряд природоохранных задач, для решения которых модели максимальных концентраций недостаточно эффективны, например:

- 1) оперативный прогноз загрязнения атмосферы;
- 2) оперативное управление качеством воздуха, опирающееся на расчет концентраций загрязняющих веществ в реальном времени с конкретными метеорологическими параметрами;
- 3) усвоение данных сети мониторинга при построении, например, среднегодовых или среднемесячных полей концентраций загрязняющих веществ на основе инвентаризации выбросов;
- 4) оптимизация расположения станций сети мониторинга в городах;
- 5) расчет внешней дозы загрязняющих веществ для перемещающихся групп населения.

Для решения указанных задач требуется иметь в наличии оперативные модели расчета концентраций, относящихся к заданному моменту времени и соответствующему набору метеорологических параметров. Так как при моделировании состояния атмосферы обычно задается ограниченным набором входных параметров, таких как скорость ветра, масштаб длины Монина-Обухова, параметр шероховатости, высота пограничного слоя и т.д., одному рассчитанному по оперативным данным значению



концентрации будет соответствовать множество данных измерений, выполненных при тех же внешних условиях. Поэтому расчетная модель должна быть ориентирована на воспроизведение определенных статистических характеристик распределения измеренных значений концентраций по оперативным данным, таких, например, как условное среднее значение или верхние процентиля распределения при этих конкретных условиях. Для краткости оперативная расчетная модель, воспроизводящая условное среднее значение концентраций, относящихся к заданному моменту времени и соответствующему набору метеорологических параметров, будет в дальнейшем называться моделью расчета концентраций по оперативным данным или моделью расчета «актуальных» концентраций. Разработке методологии построения такого рода моделей и ее конкретной реализации посвящается предлагаемая диссертация.

Цель и задачи исследования

Целью данной работы является разработка методологии и построение модели расчета концентраций атмосферных примесей антропогенного происхождения по оперативным данным на основе решения уравнения атмосферной диффузии. В качестве входной информации в модели используются данные наземных измерений.

В соответствии с этой целью в диссертации были поставлены следующие задачи:

- 1) Формулировка принципов сопоставления расчетов и данных измерений для рассматриваемого класса моделей расчета концентраций по оперативным данным;
- 2) Разработка математической модели диффузии примеси от точечного источника при конкретных внешних условиях;
- 3) Параметризация пограничного слоя атмосферы, позволяющая по данным наземных наблюдений получить информацию, необходимую для расчетов по модели;
- 4) Реализация современной модели диффузии, основанной на едином методическом подходе к расчету рассеяния примеси при различных метеорологических условиях;
- 5) Развитие методологии применения разработанной модели для решения задач, возникающих в атмосфероохранной практике.

Научная новизна работы

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

- 1) Развита методология построения моделей расчета концентраций по оперативным данным;
- 2) Разработана математическая модель диффузии примеси от точечного источника по оперативным данным;

- 3) Предложена модель расчета рассеивания примеси при конвективных условиях на основе представления о перемежаемости восходящих и нисходящих течений в пограничном слое атмосферы. Результаты расчетов при стремлении турбулентного теплового потока к нулю переходят в решение уравнения диффузии при нейтральной стратификации;
- 4) Для сопоставления модельного расчета и трассерных измерений предложена процедура фильтрации содержащихся в данных измерений шумов, которые вызваны меандрированием факела.

Практическая ценность и реализация результатов работы

Результаты работы могут быть использованы при решении широкого круга задач, связанных с охраной воздушного бассейна от загрязнения, включая:

- усвоение данных инструментального мониторинга при картировании загрязнения атмосферы;
- совершенствование методологии оперативного прогнозирования загрязнения воздуха городов за счет совместного использования данных измерений и расчетов;
- для оценки ущерба здоровью различных групп населения путем расчета внешней дозы загрязняющих веществ для перемещающегося населения с учетом режимов работы предприятий и автотранспорта.

На основе рассмотренной модели разработана программа расчета концентраций по оперативным данным на персональном компьютере.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на конференциях: "Air Pollution Modelling and Its Application XIV", 2000 г., «Seventh International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes», Belgirate, Italy, May 28-31, 2001 г., «Гидродинамические методы прогноза погоды и исследования климата, проводившейся в ГГО им.А.И.Воейкова 19-21 июня 2001 г., а также на семинарах отдела исследования и мониторинга загрязнения атмосферы ГГО. По теме диссертации опубликовано 6 работ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы. Объем диссертации составляет: 100 страниц, включая 23 рисунка, 11 таблиц и библиографию из 89 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, дается общая характеристика работы, формулируются цели и основные задачи исследования, отмечается его научная новизна и практическая ценность.

В первой главе обсуждаются принципы сопоставления результатов расчетов по моделям по оперативным данным и данным измерений; приводится обзор наиболее распространенных типов локальных моделей атмосферной диффузии примеси, и рассматриваются вопросы, связанные с их построением: описываются варианты параметризации пограничного слоя атмосферы и особенности распространения примеси в условиях развитой конвекции.

Проблема сопоставления модельных расчетов и данных измерений связана с наличием принципиального противоречия между детерминистическим описанием рассеяния в атмосфере при моделировании с помощью системы уравнений диффузии и гидродинамики и случайной природой измеренных значений концентрации примеси. Расчеты концентраций, выполненные по оперативным данным, будут согласовываться с измерениями значительно лучше, если сравниваться будут не отдельные значения концентраций, а определенные статистические характеристики. После выделения ряда режимов определяющих параметров и разбивкой массива данных измерений на соответствующие им группы проводится статистическая обработка групп данных измеренных и расчетных значений концентраций, и затем выполняются сравнения статистических характеристик распределений измеренных и расчетных величин.

В диссертации в качестве такой моделируемой статистической характеристики для группы данных измерений, соответствующих набору внешних определяющих параметров, которые получены по оперативным данным, принято условное среднее значение концентрации. Такая постановка задачи осуществлена впервые.

Во второй главе описывается постановка и решение задачи построения модели расчета концентраций примесей по оперативным данным с учетом основных существующих представлений о закономерностях атмосферной диффузии при различной температурной стратификации.

В разделе 2.1 формулируется постановка задачи о распространении пассивной примеси при метеорологических условиях, определенных для конкретного момента времени. Расчет осуществляется с помощью численного решения уравнения атмосферной диффузии примеси в турбулентном потоке:

$$U \frac{\partial C}{\partial x} = - \frac{\partial u_i c'}{\partial x_i} \quad (1)$$

Здесь ось x направлена вдоль средней скорости ветра U , C – концентрация примеси, $u_i c'$ – турбулентный поток примеси, для аппроксимации которого в работе используется схема замыкания 1-го порядка с K_y и K_z – коэффициентами диффузии в поперечном к оси факела и вертикальном направлениях. По повторяющемуся индексу i в (1) предполагается

суммирование от 1 до 3. Решение уравнения диффузии от точечного источника C сводится к решению уравнения диффузии от бесконечного линейного источника C' с условиями отражения потока примеси от поверхности земли и на верхней границе пограничного слоя атмосферы. Для перегретых и характеризующихся начальным импульсом выбросов используются формулы расчета эффективной высоты источника.

При развитой конвекции существуют особенности рассеяния примеси, которые не моделируются на основе решения одного уравнения диффузии и существенно отличаются от распространения факела примеси при слабо конвективной, нейтральной или устойчивой стратификации. Так, из данных натуральных и лабораторных экспериментов следует, что ось факела примеси, выбрасываемой из линейного наземного источника, поднимается вверх, а затем снова опускается вниз, что приводит к формированию второго максимума в распределении приземных концентраций. При рассеянии от высотного источника ось факела вблизи источника опускается вниз, затем поднимается вверх и потом снова опускается вниз, что в конечном счете, также приводит к формированию второго максимума в приземных концентрациях. Эти результаты объясняются тем, что при развитой конвекции в пограничном слое формируются поднимающиеся вверх термики и компенсирующие нисходящие течения, причем предположение о пропорциональности турбулентного потока примеси ее локальному градиенту не позволяет адекватно описывать рассеяние примеси в этих условиях с помощью уравнения (2.1). Согласно представлению о перемежаемости восходящих и нисходящих течений, сформулированному Е.Л. Гениховичем, с вероятностью p_+ примесь из источника попадает в восходящий поток, с вероятностью p_- - в нисходящий. Результирующая концентрация C' состоит из суммы вкладов восходящих и нисходящих течений:

$$C' = p_+ C'_+ + p_- C'_- \quad (2)$$

Перенос пассивной примеси восходящими и нисходящими течениями описывается системой уравнений:

$$U \frac{\partial C'_+}{\partial x} + W_+ \frac{\partial C'_+}{\partial z} = - \frac{\partial \overline{c'w'_+}}{\partial z}, \quad (3)$$

$$U \frac{\partial C'_-}{\partial x} - W_- \frac{\partial C'_-}{\partial z} = - \frac{\partial \overline{c'w'_-}}{\partial z},$$

где C'_+ , C'_- , W_+ , W_- , $\overline{c'w'_+}$, $\overline{c'w'_-}$ - значения средних концентраций, средние скорости и турбулентные потоки примеси, соответственно, в восходящих и нисходящих струях. Турбулентные потоки параметризуются по схеме замыкания 1-го порядка:

$$\overline{c'w'_+} = -K_+ \frac{\partial C'_+}{\partial z}, \quad \overline{c'w'_-} = -K_- \frac{\partial C'_-}{\partial z},$$

где K_+ и K_- - коэффициенты турбулентной диффузии в восходящих и нисходящих потоках.

При формулировке модели расчета при неустойчивой стратификации в диссертации использована формула А. Лухара для расчета средних скоростей восходящего и нисходящего течения в зависимости от асимметрии S плотности распределения вертикальных турбулентных пульсаций скорости. С уменьшением теплового потока распределение вертикальных турбулентных пульсаций скорости переходит в гауссово, поэтому асимметрия и скорости средних вертикальных потоков стремятся к нулю. При этом система из двух различных уравнений диффузии (2) фактически переходит в одно классическое уравнение диффузии (1).

В разделе 2.2 описывается параметризация пограничного слоя атмосферы, применявшаяся при моделировании. Так как разработанная модель расчета поля концентраций по оперативным данным ориентирована на использование стандартных метеорологических наблюдений, входными метеопараметрами в модели являются шероховатость z_0 и скорость ветра U_{10} на высоте $z=10$ м и, в качестве характеристики температурной стратификации, безразмерный параметр λ , определенный как отношение коэффициента турбулентного обмена K_1 к скорости ветра u_1 на высоте $z_1=1$ м. Масштабами длины и скорости в приземном слое атмосферы служат динамическая скорость u_* и масштаб длины Монина-Обухова L , определяемые по входным метеорологическим данным. В конвективном слое перемешивания масштабирование осуществляется на H - высоту пограничного слоя и w_* - конвективную скорость. Высота пограничного слоя H при нейтральной и устойчивой стратификации определена согласно С.С. Зилитинкевичу, а при свободной конвекции определялась по уравнению, полученному, как результат аппроксимации экспериментальных данных по высотам пограничного слоя, определявшимся в ходе серии измерений CONDORS (США).

В приземном слое атмосферы для параметризации профилей коэффициента турбулентного обмена и скорости ветра используются соотношения теории подобия. На верхней границе пограничного слоя скорость ветра принимается равной геострофической, вычисляемой из наземных наблюдений по логарифмическому закону трения. При неустойчивой стратификации коэффициент турбулентной диффузии примеси в восходящих и нисходящих потоках представляется в виде суммы двух членов, соответствующих условиям развитой конвекции $K_{c\pm}$ и слабой неустойчивости K_{h1} :

$$K_{\pm} = \alpha(H/L) \cdot K_{c\pm} + \beta(H/L) \cdot K_{h1}, \quad (4)$$

где α и β - весовые множители. Величина K_{h1} параметризуется в соответствии с теорией подобия для слабоконвективных условий в приземном слое, в середине слоя полагается постоянной и уменьшается

при $z' \rightarrow 1$. Величина K_{\pm} соответствует коэффициенту турбулентной диффузии при развитой конвекции в восходящих или нисходящих потоках, причем вблизи подстилающей поверхности и запирающей инверсии K_{\ominus} и K_{\oplus} должны, соответственно, уменьшаться, а в средней части конвективного слоя оставаться постоянными. Параметризация K_{\pm} выполнена на основе модели Дж. Вингаарда и К. Моэнг, а выбор области, в которой коэффициенты K_{\ominus} и K_{\oplus} постоянны, осуществлялся на основе сравнения расчетов по модели с данными лабораторных экспериментов (рис.1).

Скорости потоков W_+ и W_- и вероятности их существования p_+ и p_- являющиеся параметрами уравнений (2), связаны с асимметрией плотности распределения вертикальных турбулентных пульсаций и постоянны по высоте в данной модели.

В разделе 2.3 приводится схема численного решения уравнения диффузии и описываются свойства полученного распределения концентрации в условиях термической конвекции. При построении численной схемы в конвективных условиях был введен масштаб длины по оси X , $X_{\text{норм}}$, учитывающий параметр свободноконвективного масштабирования w_* и масштаб скорости u_* :

$$X_{\text{норм}} = HV / \sqrt{u_*^2 + w_*^2}, \quad (5)$$

где V средняя скорость ветра в пограничном слое, $V = \int_{z_0}^H U(z') dz'$. Масштабом

по оси z служит высота пограничного слоя, H .

При построении дискретной аппроксимации исходной задачи в ее дифференциальной постановке был использован интегроинтерполяционный метод баланса, при котором на расчетной сетке выполняется закон сохранения массы примеси. Проверка применимости расчетной схемы осуществлялась путем сравнения распределения концентрации $C'(x', z')$, вычисленного при $L = -1000$ м, с опубликованным распределением, найденным по двухпараметрической модели Е.Л. Гениховича и С.С. Чичерина, а также путем сравнения численных и известных аналитических решений при аппроксимации коэффициентов уравнения диффузии степенными функциями.

Результаты расчета сравнивались с данными лабораторных измерений Дж. Дирдорфа и Г. Уиллиса, а также с результатами стохастического моделирования диффузии Р. Лэма и А. Лухара. На рис.1 приведено вертикальное распределение примеси для источников высотой $H_e = 0.24, 0.49, 0.75$, вычисленное по стохастической модели А. Лухара и по модели расчета концентраций по оперативным данным. Распределение $C'(x', z')$, полученное по рассматриваемой модели, соответствует данным экспериментов: выбросы из источников высотой больше $0.1H$ переносятся к земле, затем на расстояниях $x' = 1 - 2$ поднимаются вверх, а при $x' = 3 - 4$

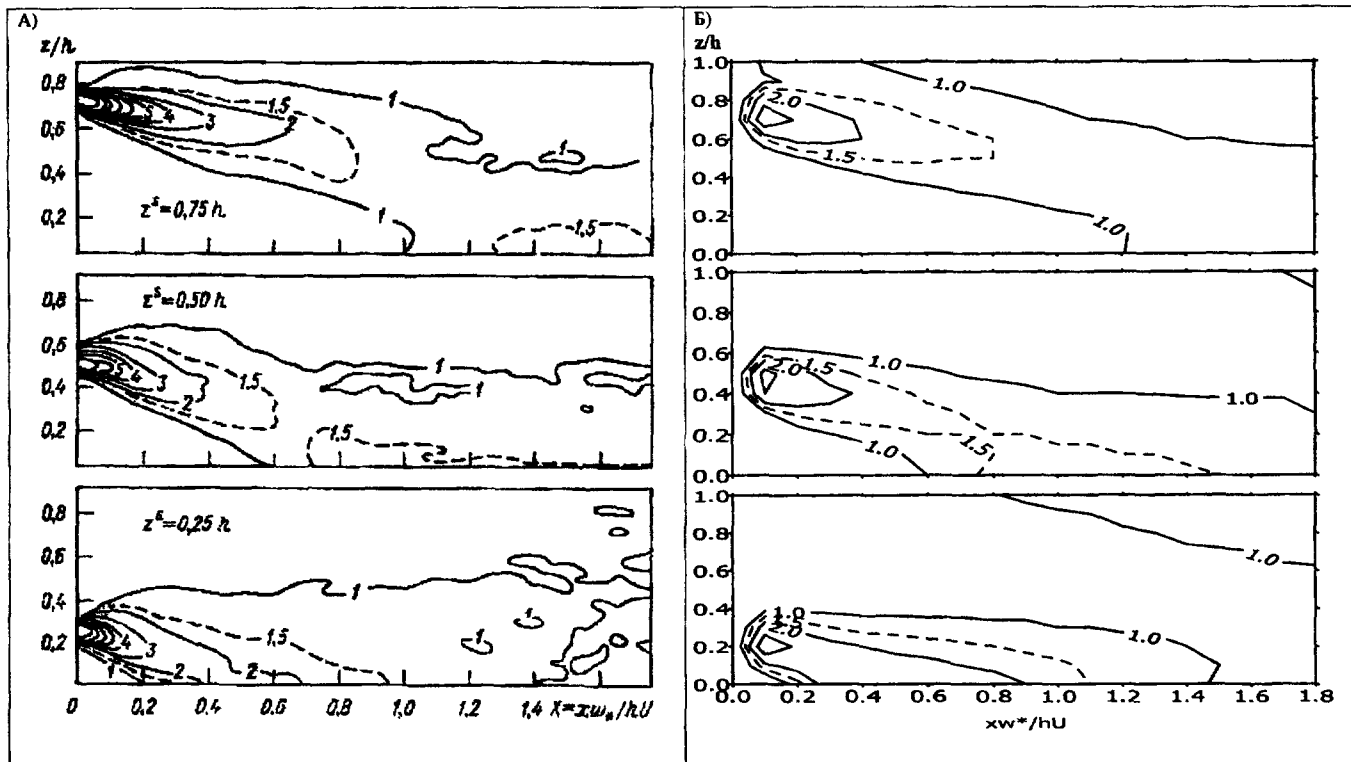


Рисунок 1. Зависимость безразмерных концентраций от линейного источника разной высоты от X и Z А) по стохастической модели Лэма и Б) по модели расчета концентраций по оперативным данным

наблюдается небольшой второй максимум. Для высоких источников $He=0.9H$ наблюдаются максимумы вблизи земли и на верхней границе пограничного слоя вблизи источника. Выполнены также сравнения расчетов высоты оси факела, определяемой как «центр тяжести» концентрации примеси в факеле, с результатами лабораторных измерений Дж. Дирдорфа и Г. Уиллиса и расчетами по стохастической модели Дж. Баренстейна и Р. Берковича. Согласие между лабораторными результатами и расчетами по модели хорошее.

Для практических расчетов построена аналитическая аппроксимация зависимости приземных безразмерных концентраций от расстояния до источника. В режиме развитой конвекции ($-H/L > 10$) определяющими параметрами этой зависимости являются нормированные величины эффективной высоты источника He' и расстояния от него x' , при слабой конвекции приземная концентрация вычисляется на основе аппроксимаций распределений концентраций для развитой конвекции и нейтральной стратификации, взятыми с коэффициентами, являющимися функциями от отношения ($-H/L$).

В разделе 2.4 анализируется решение уравнения диффузии примеси при нейтральной и устойчивой стратификации. При численном решении использовались безразмерные переменные, в качестве масштаба для высот и расстояний использовалась высота пограничного слоя H . Полученная система разностных уравнений решалась методом прогонки. Характерной чертой расчетного поля концентраций примеси от линейного источника $C'(x', z')$ является выход вертикального распределения C'_∞ на больших расстояниях на константу, что является следствием соблюдения закона сохранения потока примеси и условием ее отражения от верхней и нижней границ области интегрирования.

При аппроксимации приземного безразмерного поля концентрации оказалось, что двух метеорологических параметров - числа Россби Ro и параметра устойчивости $\mu = \kappa \frac{u_*}{L f}$, вычисляемых по входным метеорологическим данным, а также безразмерных величин - расстояния от источника и эффективной высоты источника достаточно для определения приземной концентрации. Для практического использования выполнен численный расчет распределения концентрации для наборов значений параметров Ro , μ , He' , x' перекрывающих весь диапазон изменений этих величин. Значения концентраций при произвольных метеорологических параметрах определяются интерполяцией по затабулированным распределениям.

В разделе 2.5 выполнена численная проверка перехода решения двухпоточковой системы уравнений в стандартное уравнение диффузии при стремлении к нулю турбулентного теплового потока (при $L \approx 1000$ м).

Вертикальные распределения полей концентраций, рассчитанные по режиму конвекции и на основе одного уравнения диффузии при нейтральной стратификации, практически совпадают.

На основании представленных результатов можно сделать вывод о том, что описание процесса диффузии примеси при развитой конвекции с помощью совместного решения двух уравнений диффузии воспроизводит основные особенности рассеяния примеси и в пределе равновесной стратификации переходит в стандартное решение уравнения диффузии. Это позволяет говорить о внутренней согласованности модели. Такая постановка задачи моделирования диффузии на основе решения уравнения диффузии при различных метеорологических условиях, включающих развитую конвекцию, выполнена впервые.

В третьей главе развивается методика сравнения результатов расчета концентраций по детерминистической модели по оперативным данным и случайных результатов измерений, а также проверка применимости модели расчета концентрации на независимых данных трассерного эксперимента KINCAID (США).

В разделе 3.1 формулируются принципы структурирования данных измерений для проведения сравнений с результатами моделирования по оперативным данным: скорости ветра, параметру шероховатости, параметру стратификации атмосферы, характеристикам режима работы источника выбросов. Из-за случайного характера измеренных значений концентраций проводится предварительная группировка данных измерений и расчетов по диапазонам изменений основных параметров. В работе полагается, что модельный расчет должен позволять определить условное среднее измеренных значений концентраций.

Для тестирования модели на данных измеренных значений максимальных концентраций шестифтористой серы на тепловой электростанции KINCAID (США), предварительно проводилась группировка измерений по грациям параметра устойчивости, скорости ветра, эффективной высоте источника выбросов и расстоянию до него. Для этих групп данных показано, что функции распределений измеренных значений концентраций хорошо аппроксимируются логнормальным законом.

В разделе 3.2 рассматривается вопрос повышения качества информации, полученной из измерений, путем фильтрации содержащихся в данных измерений шумов, которые вызваны меандрированием оси факела. Специфика предлагаемого подхода заключается в том, что корректируются не отдельные измерения, а построенные по ним эмпирические функции распределения. Как показано в этом разделе, плотность вероятностей отфильтрованных значений концентраций f_{inc} определяется с использованием Фурье преобразований плотностей распределения логарифмов измеренных величин концентраций $F_{lnq}(\omega)$ и

Фурье преобразований плотностей распределения квадратов отклонений осредненной оси факела от точки измерения $F_{-y^2/2}(\omega)$

$$f_{\text{INC}}(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega x} \frac{F_{\text{INC}}(\omega)}{F_{-y^2/2}(\omega)} d\omega \quad (6)$$

Искомая плотность распределения $f_{\text{INC}}(x)$ определялась численно для каждого значения аргумента x с использованием найденных в работе параметров распределений. Эффективность процедуры фильтрации показана в разделе 3.3 на примере данных трассерных измерений.

В разделе 3.3 рассматриваются результаты тестирования модели на данных трассерных измерений KINCAID. Посты измерений приземных концентраций располагались по дугам радиуса 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20 км с центром в источнике на равном расстоянии друг от друга таким образом, чтобы охватить факел примеси. Результаты измерений включали: значения определяющих метеорологических параметров, характеристики режима работы источника, максимальное значение измеренной концентрации на постах дуги заданного радиуса. В зависимости от метеорологических условий и режима работы источника выбросов данные были разделены на 5 групп, и функции распределения концентраций аппроксимировались логнормальным распределением.

Внутри каждой группы обрабатывались все ненулевые измерения и для данного расстояния вычислялись параметры логнормального распределения измеренных концентраций. Пример, иллюстрирующий эффективность применения процедуры фильтрации измерений, приведен в табл.1. Уменьшение дисперсии в среднем за счет фильтрации составляет 20-30%.

Сравнения расчетов концентраций по модели и восстановленного условного среднего значения измерений для 5 групп данных оказались удовлетворительными.

Таблица 1.

Отношения дисперсий отфильтрованного распределения и исходного для трех групп данных:

X, км	$\sigma^2 c / \sigma^2 q$, 1-ая группа	$\sigma^2 c / \sigma^2 q$, 2-ая группа	$\sigma^2 c / \sigma^2 q$, 3-ая группа
2	0,7744	0,6889	0,7396
3	0,7744	0,6889	0,8281
5	0,7744	0,7569	0,8281
7	0,7744	0,7569	0,7744
10	0,81	0,7569	0,7921
15	0,7056	0,6889	0,8464
20	0,7056		

В разделе 3.4 приводятся результаты сравнения расчетов по модели с данными, полученными в ходе эксперимента CONDORS (США), проводившегося в условиях развитой конвекции. Для 7 серий измерений сравнивались измеренные и расчетные проинтегрированные поперек ветра значения концентраций алюминиевой пыли в слое у поверхности земли (рис.2), а также положения центра тяжести факела. Как видно из рисунка, получено удовлетворительное соответствие данных измерений и расчетов.

Таким образом, проведенные сравнения показали, что расчеты по модели расчета концентраций по оперативным данным согласуются с экспериментальными данными при различных стратификациях. На основании этого можно сделать вывод, что предположения, использованные при описании процесса диффузии в условиях развитой конвекции и параметризация пограничного слоя и коэффициентов турбулентной диффузии, использованные при построении рассматриваемой модели при различной стратификации, с удовлетворительной точностью отражают реальные процессы рассеивания в атмосфере.

В четвертой главе рассматриваются возможности практического применения модели расчета концентраций по оперативным данным. Следует подчеркнуть, что приводимые примеры такого рода применений являются только иллюстрацией и не должны рассматриваться как готовые методики. Тем не менее, полученные результаты существенны уже хотя бы потому, что позволяют определить, какого рода требуется исходная информация и какие данные необходимы для валидации предлагаемых подходов.

В разделе 4.1 описывается применение модели для решения задачи корректировки поля среднегодовых концентраций в городе по данным инструментального мониторинга загрязнения атмосферного воздуха. Поля концентраций загрязняющих веществ в городе имеют сложную структуру, вызванную нерегулярным распределением источников. Реконструкция поля концентраций в произвольных точках на территории города только по данным измерений не является корректной, т.к. сеть мониторинга в городах, состоящая обычно из 3-15 постов, не способна детально воспроизвести изменчивый характер поля концентраций. В данной связи в работе предложен способ усвоения результатов наблюдений при расчете полей концентраций, основанный на использовании аппарата оптимальной интерполяции, широко применяемого при решении метеорологических задач. Особенностью предлагаемого подхода является использование модели для расчета как первых так и вторых (в том числе, смешанных) пространственных моментов на регулярной сетке точек.

В разделе 4.2 модель расчета концентраций по оперативным данным применяется к расчету внешней популяционной дозы перемещающегося населения. Расчет дозы для отдельных групп населения и населения в

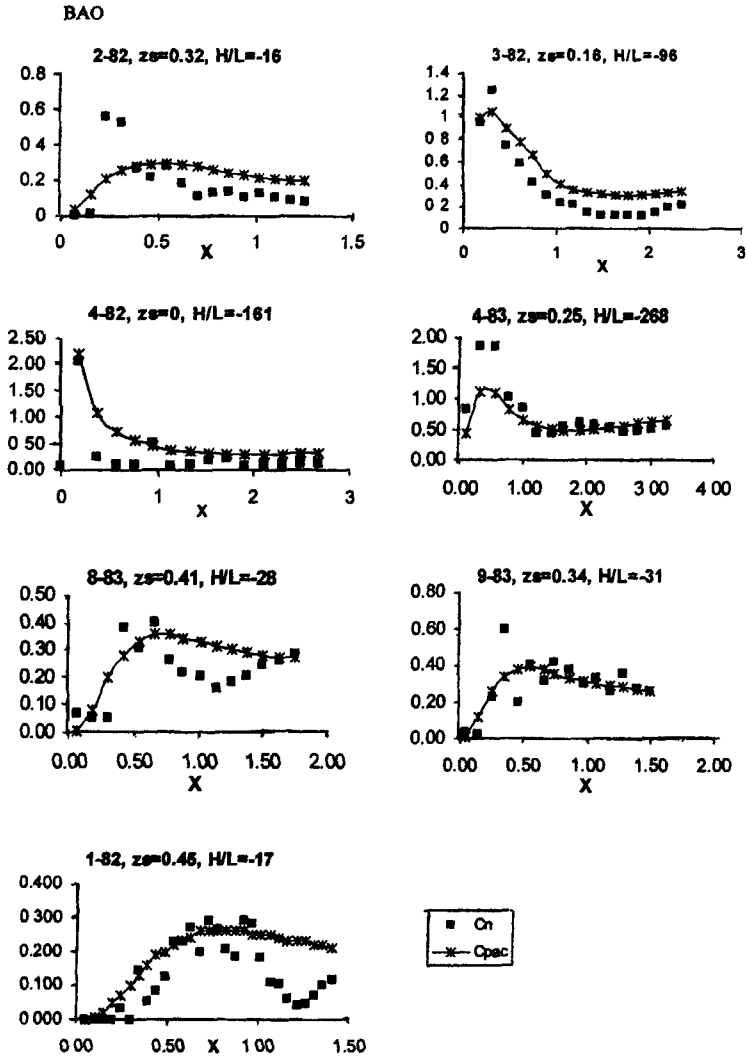


Рис. 2 Распределение концентрации от линейного источника в приземном слое по модельным расчетам ($C_{рас}$) и данным эксперимента CONDORS (C_n). Ось X на графиках показана в безразмерных переменных. В заголовках указаны период измерений, нормированная высота источника, отношение высоты пограничного слоя к масштабу Монина-Обухова.

целом с учетом его миграции является основой для определения риска здоровью, используемого на практике при принятии решений в области охраны здоровья населения.

Необходимыми данными для расчета внешней дозы по модели расчета концентраций по оперативным данным являются такие метеорологические параметры, как скорость и направление ветра, параметр стратификации атмосферы, температура воздуха, а также мощности выбросов источников, режим работы предприятий, численность населения на единицу площади как функция времени и координат. Представляется целесообразным на территории города выделить ряд районов, внутри которых распределение численности населения в определенные моменты времени можно считать постоянным, например, промышленные, «спальные», центральный. Наличие статистических данных о численности населения и объемах транспортных перевозок позволяет отследить динамику распределения численности населения в районах города. Мощность выбросов предприятий и автотранспорта, влияющая на интенсивность загрязнения, изменяется в течение суток, дней недели и сезонов года. Для проведения расчетов временной период накопленной дозы разбивается на непересекающиеся интервалы ΔT_i , соответствующие определенным постоянным условиям режимов работы (например, ночь, утро, день, вечер, день недели, сезон года) и постоянной плотности численности населения по территории районов города. При вычислении внешней дозы внутри временного интервала постоянной мощности источников, интегрирование (суммирование) по времени заменяется интегрированием по области изменения значений комплекса метеорологических параметров:

$$\text{ДОЗА}_{ГР} = \sum_i \Delta T_i \cdot \sum_k \rho_{ik} \int_{\Omega} \int_{Sk} C(x, y, \omega) p_i(\omega) d\omega \cdot dSk, \quad (7)$$

где $p_i(\omega)$ - совместная плотность распределения метеорологических параметров ω , вычисленная для каждого выделенного режима работы источников i , ρ_{ik} - наборы данных о распределении численности населения в определенные моменты времени i в районе k , $C(x, y, \omega)$ - концентрация в точке (x, y) по оперативным данным ω с учетом i -го режима работы источников, Ω - область изменения метеорологических параметров, Sk - территория k -го района города. Рассмотренный подход впервые дает возможность оценить внешнюю дозу с учетом корреляционных связей между динамикой выбросов и перемещением населения.

В качестве иллюстративного примера в диссертации выполнена оценка индивидуальной внешней дозы по метеорологическим данным и материалам инвентаризации выбросов сернистого газа для г. Пскова. В результате расчетов, проведенных для точек промышленной зоны, жилой зоны и для мигрирующего индивидуума оказалось, что годовая внешняя доза, вычисленная с учетом миграции, весьма чувствительна к временному

ходу мощности выбросов предприятий, в отличие от внешних доз, вычисленных в фиксированных точках города, а именно, ее величина в рассмотренном примере на 22% превышает результат, полученный без учета временного хода мощностей выбросов. Следовательно, оценка внешних доз перемещающихся групп населения, выполненная на основе расчета концентрации по оперативным данным с учетом графика режима выбросов (в том числе, автотранспорта) по сезонам и в течение суток, может существенно отличаться от оценочных расчетов, проведенных с использованием осредненных измеренных или рассчитанных по среднегодовым мощностям выбросов значений концентраций загрязняющих веществ.

Заключение

В процессе выполнения работы получены следующие основные научные выводы и результаты:

- 1) Развита методология построения моделей расчета концентраций по оперативным данным, основанная на их сопоставлении с условными средними значениями соответствующих природных характеристик;
- 2) Предложен способ фильтрации шумов, связанных с меандрированием оси факела, основанный на преобразовании эмпирических функций распределения измеренных концентраций;
- 3) Разработана математическая модель диффузии примеси от точечного источника по оперативным данным, использующая в качестве входной информации данные наземных метеорологических измерений. В частности, предложена модель расчета рассеивания примеси при конвективных условиях на основе представления о перемежаемости восходящих и нисходящих течений в рассматриваемой точке пограничного слоя атмосферы;
- 4) Возможности применения разработанной модели продемонстрированы на примере решения двух задач прикладного характера:
 - усвоение данных мониторинга загрязнения атмосферы при картировании полей долгопериодных средних концентраций;
 - расчет внешней индивидуальной и групповой доз загрязняющих веществ с учетом миграции реципиентов.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- 1) A PDF approach to processing the data of tracer experiments for validation the dispersion models. Seventh International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Belgirate, Italy, May 28-31, pp.33-36, 2001 (совместно с Е.Л.Гениховичем)
- 2) Adaptive dispersion modeling and its applications to integrated assessment and hybrid monitoring of air pollution. In: Air Pollution Modelling and Its

- Application XIV (Ed. S.-E. Gryning, F. Schiermeier), 2001, Kluwer Academic/Plenum Publishers, NY.-pp. 475 - 480 (совместно с Е.Л. Гениховичем, А.Д. Зивом)
- 3) A method for mapping the air pollution in cities with the combined use of measured and calculated concentrations. *International Journal of Environment and Pollution*, Inderscience Enterprises Ltd., Oxford, Vol.18, No.1, 2002, p.56-63 (совместно с Е.Л. Гениховичем, А.Д. Зивом)
 - 4) Объединенная модель атмосферной диффузии от совокупности источников. В сб.: Проблемы физики пограничного слоя атмосферы и загрязнения воздуха. К 80-летию профессора М.Е.Берлянда. // Гидрометеоиздат, Санкт-Петербург, 2002, с. 58-75 (совместно с Е.Л. Гениховичем)
 - 5) Модель расчета актуальной концентрации от совокупности источников. // Вопросы охраны атмосферы от загрязнения. Информационный бюллетень №2(26), НИПК «Атмосфера» при ГГО им. А.И.Воейкова, Санкт-Петербург, 2002 г., с.58-62
 - 6) Объединенная модель атмосферной диффузии от совокупности источников. // Конференция молодых ученых «Гидродинамические методы прогноза погоды и исследования климата», 19-21 июня 2001г., Тезисы докладов. (Посвящается 80-летию отдела динамической метеорологии ГГО), Гидрометеоиздат, Санкт-Петербург, 2003г., с.277-284

Заказ № 315

Отпечатано в ООО "КОПИ-Р", ул., Колокольная, 12

Подписано к печати 17.10.2005 г. Тираж 100 экз. .

№ 19678

РНБ Русский фонд

2006-4

20837