

Министерство образования и науки РФ
Федеральное агентство по образованию
ГОУ ВПО
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(РГГМУ)



На правах рукописи

УДК 551.511.072

Баранова Мария Евгеньевна

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

1 4 0 0 0 0 0 0 0

Санкт-Петербург
2008

Диссертация выполнена на кафедре Метеорологии, климатологии и охраны атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета.

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук, профессор,
Гаврилов А.С.

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук, профессор,
Вагер Б.Г.

Кандидат физико-математических наук, доцент,
Егоров К.Л.

Ведущая организация: Научно-исследовательский центр экологической
безопасности Российской Академии Наук (НИЦЭБ
РАН)

Защита диссертации состоится “27” ноября 2008 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д.212.197.01 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу:
195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, тел. (812) 444-41-63.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу:
195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

Автореферат разослан “27” октября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,



доктор физ. - мат наук,
профессор, А. Д. Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Состояние качества воздушной среды в городах в настоящее время является одной из острых проблем современности. В большинстве городов мира загрязнение воздуха достигает критических размеров. По оценкам Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), показатели качества воздуха в 20 крупнейших городах мира в несколько раз превышают установленные ВОЗ нормативы. Более 1 млрд. горожан подвержены воздействию опасных для здоровья уровней загрязнения воздуха. Так, например, в 11 крупнейших городах Китая загрязнение воздуха является причиной более 50 тыс. преждевременных смертей и 400 тыс. новых случаев хронических бронхитов ежегодно.

Согласно прогнозам, в 2010 году 70 % жителей европейских городов будут проживать на территориях с превышением ПДК по пыли, 20 % жителей – с превышением ПДК по оксиду азота, 15 % жителей – с превышением ПДК по бензолу. По мере роста количества автомобилей серьезной проблемой в городах Европы стал фотохимический смог, причиной которого являются выбросы соединений азота и углерода в атмосферу. В последние годы наблюдается резкое увеличение астмы среди детей, часто обостряемое из-за загрязнения воздуха в европейских городах, а также количественная зависимость между уровнем канцерогенов в атмосфере и раком легких у жителей европейских городов.

В Российской Федерации около 44 % населения страны живет в городах, в которых превышены установленные нормы загрязненности воздуха. Экологическую ситуацию в городе принято оценивать применительно ко всей городской территории, однако усредненность результатов наблюдений по всему городу, публикуемых в официальных государственных и ведомственных докладах, не дает точной картины качества окружающей среды по месту проживания людей. В то же время общеизвестно, что на территории промышленных городов имеются различные по экологической ситуации и загрязненности участки, требующие первоочередных мер, экономических затрат и усилий общества в плане улучшения качества окружающей среды.

Исходя из изложенного выше, появляется необходимость в детальном воспроизведении динамики воздушных потоков над урбанизированными территориями с учетом всех элементов ландшафта, таких как формы рельефа, жилая и промышленная застройка, наличие парковых и лесопарковых зон. Столь же детальное представление здесь требуется и для источников выбросов в атмосферу, особенно для таких сложных, как автотранспорт, занимающих в современных мегаполисах весьма значительную долю всего выброса. В этом случае, как известно, выброс загрязняющих веществ в атмосферу происходит от низко расположенного источника, погруженного в городскую застройку, который создает, таким образом, поля загрязнения с высокими пространственными градиентами и сильной временной изменчивостью.

Исследование такого рода полей чисто экспериментальными методами оказывается весьма затруднительным и требует, вообще говоря, разработки специальных математических моделей высокого пространственного разрешения, учитываю-

щих все нюансы влияния на перенос и рассеяние примеси городской застройки. Несмотря на значительные усилия, которые предпринимались в последние десятилетия различными научными коллективами для решения проблемы построения тех или иных методик расчета загрязнения атмосферы выбросами промышленных и транспортными источниками, именно упомянутым особенностям загрязнения урбанизированных территорий не уделялось надлежащего внимания.

Только с появлением в 90-х годах прошлого века персональных компьютеров, созданием и широким распространением геоинформационных систем оказалось возможным объединить достаточно сложные гидротермодинамические модели атмосферы с современными пространственными моделями геоданных и дать в руки потребителей достаточно эффективные методы решения задач обеспечения экологической безопасности.

Целью работы является: развитие обозначенного подхода в направлении разработки и верификации методов расчета динамики атмосферы и характеристик ее загрязнения с высокой пространственной детализацией применительно к проблемам охраны атмосферы урбанизированных территорий в целом и, прежде всего, крупных мегаполисов.

Для достижения поставленных целей в диссертационной работе были сформулированы следующие задачи:

- адаптировать разработанную ранее численную модель переноса и рассеяния примесей с учетом застройки ГДМ+МК (ГидроДинамическая Модель + метод Монте-Карло) применительно к расчетам переноса и рассеяния примесей в окрестности тонких (толщиной менее шага расчетной сетки) элементов подстилающей поверхности;
- осуществить комплекс исследований по тестированию алгоритмов и верификации модели ГДМ+МК с учетом, также, и натурных измерений на экспериментальных площадках в таких крупных мегаполисах, как Москва и Санкт-Петербург;
- разработать метод реализации модели ГДМ+МК применительно к проведению расчетов вероятностных характеристик полей скорости ветра, а также климатологических характеристик загрязнения атмосферы от выбросов автотранспорта применительно к мегаполисам;
- разработать метод коррекции расчетных значений осредненных за длительный период значений приземной концентрации примесей от выбросов автотранспорта по данным накопленных измерений на постах городской системы мониторинга атмосферы.

Методы исследования. Основные методы исследования – компьютерное моделирование с использованием численной модели ГДМ+МК, а также статистиче-

Москва (размер несколько десятков километров) с учетом влияния застройки на конфигурацию полей загрязнения от автотранспортных источников.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Метод расчета переноса и рассеяния примесей в атмосфере в окрестности тонких (толщиной менее шага расчетной сетки) элементов подстилающей поверхности.

2. Результаты верификации модели ГДМ+МК применительно к расчету полей скорости ветра и концентрации на основе натуральных измерений и результатов измерений в аэродинамических трубах.

3. Результаты расчета потенциала загрязнения атмосферы (ПЗА) с учетом влияния на поле ветра застройки города с высоким пространственным разрешением для всей территории города Москва.

4. Метод коррекции результатов расчета полей загрязнения атмосферы от выбросов автотранспорта с учетом данным постов измерений городской системы мониторинга.

5. Результаты расчета среднеклиматических характеристик загрязнения атмосферы с высоким пространственным разрешением для всей территории города Москва.

Обоснованность и достоверность результатов подтверждаются строгой математической постановкой задачи о численном моделировании АПС, результатами верификации модели АПС применительно к условиям урбанизированных территорий, а также статистической обеспеченностью рассчитанных характеристик загрязнения атмосферы.

Теоретическая и практическая ценность диссертации состоит в разработке оригинальных методов, позволяющих рассчитывать поля загрязненности атмосферы от выбросов автотранспортных источников с высоким пространственным разрешением для крупных урбанизированных территорий.

Апробация диссертационной работы

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались:

- на научных семинарах кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета (2003-2008 гг.);
- на заседаниях Итоговых сессий Ученого совета РГГМУ (2004-2006 гг);
- на заседаниях Международной научной конференции "Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон", СПб, РГГМУ (2005, 2006 гг.);
- на заседании международной конференции "Изменение климата и окружающая среда", СПб, РГГМУ, 06-09.12.2005 г.;
- на заседаниях Международного научно-практического семинара «Методы мониторинга атмосферы Москвы и Лондона» (Москва, сентябрь 2006г; Лондон, июнь 2007г.).

Публикации: Основные результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников, включающего 57 наименований. Общий объем работы составляет 141 страницу, включая 54 рисунка и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации; сформулированы цели и задачи исследования; приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту, теоретическая новизна и практическая значимость работы.

Первая глава является обзорной и содержит сведения об особенностях загрязнения атмосферы урбанизированных территорий, а также известную из литературных источников информацию о существующих методах моделирования переноса и рассеяния примеси в атмосфере.

Урбанизированные территории занимают немногим более 1 % площади земной суши, но концентрируют свыше 45 % всего населения Земли, производят 80 % внутреннего валового продукта, но при этом дают 80 % всех выбросов в атмосферу и гидросферу. Они характеризуются крайне высокой нагрузкой на окружающую среду: крупный город изменяет почти все компоненты природной среды – атмосферу, растительность, почву, подземные воды, грунт и даже климат, а также электрическое, магнитное и другие физические поля Земли.

Россия относится к странам с высоким уровнем урбанизации (73 %). В настоящее время на территории России продолжают развиваться около 30 крупнейших агломераций, занимающих 6 % обжитой (заселенной) территории страны и концентрирующих более 60 % городского населения.

При этом в последние десятилетия продолжается рост городского населения на фоне ухудшения экологической ситуации в крупных городах. Несмотря на уменьшение выбросов загрязняющих веществ в некоторых отраслях промышленности, в ряде регионов наблюдается обострение экологической ситуации, связанное с увеличением вклада легкового транспорта в загрязнение воздушного бассейна.

Наиболее важной особенностью загрязнения атмосферы современных мегаполисов является практически полное доминирование выбросов автотранспорта и энергетических источников по сравнению с выбросами промышленных предприятий. В Российской Федерации насчитывается более 150 городов с преобладающим вкладом выбросов автотранспорта в валовые выбросы (более 50 %).

Сравнивая данные о выбросах различных типов источников, можно сделать вывод, что, если по общему валовому выбросу в течение года доля объектов энергетики не превышает 15 %, то по таким примесям как оксиды азота эта величина возрастает до 33 %. Важно, однако, что эти два типа источников очень сильно различаются и по физическим параметрам, и по характеру загрязнения городской территории. Энергетические источники относятся к категории приподнятых перегретых

(с высотой до 250 м и температурой выброса до 250 С) и создают достаточно гладкие поля приземной концентрации загрязняющих веществ.

Автотранспортные источники являются территориально распределенными и низкими (0,2–0,5 м). Именно по этой причине их выбросы создают локализованные в пространстве приземные поля концентрации примесей с чрезвычайно высокими пространственными градиентами, характеристики которых привязаны не только к интенсивности движения автотранспорта и метеорологическим условиям, но также и к конфигурации окружающей застройки. Столь высокая пространственная неоднородность полей концентрации выдвигает чрезвычайно жесткие требования к плотности размещения измерительных средств городской системы мониторинга атмосферы (вплоть до дискретности размещения постов в 10 м), которые ни в настоящее время, ни в ближайшем будущем удовлетворить не представляется возможным чисто по экономическим причинам. Это приводит к тому, что существующие системы мониторинга состояния городской атмосферы не в состоянии дать полную картину фактической экологической обстановки, необходимую для управления качеством атмосферы города.

Для решения возникающей здесь проблемы наиболее перспективным является подход, основанный на объединении данных атмосферного мониторинга с результатами расчетов полей концентрации примесей с использованием физически содержательных математических моделей переноса и рассеяния примесей с высоким пространственным разрешением.

Основные требования, предъявляемые к этим моделям, оказываются весьма жесткими и состоят в следующем:

- возможность воспроизведения трехмерных полей компонент средней скорости ветра и характеристик турбулентности в окрестности застройки произвольной формы;
- возможность расчета полей концентрации примесей от источников сложной пространственной конфигурации;
- воспроизведение процессов химической трансформации примесей.

За последние 50 лет достигнут весьма значительный прогресс в области математического моделирования сложных технических и природных объектов в целом (Г.И. Марчук, Д.Л. Лайхтман, В.В. Пененко, А.Е. Алоян, С.С. Зилитинкевич, Б.Г. Вагер, А.А. Бакланов), и в охране окружающей среды в частности (М.Е. Берлянд, Е.Л. Генихович, S.R. Hanna, J. Deardorff, F.Pasquill, G.A. Briggs). Как показал проведенный в разделе 1.3 анализ, из всего имеющегося перечня подходов для решения поставленной задачи наилучшими являются трехмерные численные модели (3D – модели).

Так называемое «полуэмпирическое уравнение турбулентной диффузии» – наиболее распространенная основа для построения 3D-моделей переноса и рассеяния примесей атмосферы. Между тем, его использование в случае выраженной пространственной неоднородности местности и связанной с этим анизотропии атмосферной турбулентности требует задания всех девяти компонент тензора коэффициентов турбулентной диффузии K_{ij} , которые остаются неизвестными. За последние десятилетия делалось множество попыток построить те или иные модели расчета компонент тензора K_{ij} (А.С. Монин, А.М. Яглом, 1992), однако успех был достигнут лишь для некоторых упрощенных ситуаций, таких, например, как задача о переносе

и рассеянии примесей в условиях однородного по горизонтали атмосферного пограничного слоя.

От этого недостатка свободны, как показано в следующей, второй главе, лагранжевы стохастические модели турбулентной диффузии, которые и использовались в настоящем исследовании.

Во второй главе излагается численная модель переноса и рассеяния примесей в городской атмосфере с учетом их химической трансформации. Предложен оригинальный подход к использованию данных мониторинга атмосферы применительно к расчету загрязнения атмосферы выбросами автотранспорта.

Исходными уравнениями в любых гидродинамических моделях являются уравнения Навье-Стокса (для трех компонент эйлеровой скорости), уравнение состояния, связывающего давление с плотностью и температурой, закон сохранения массы в форме так называемого «уравнения неразрывности», а также 1-е начало термодинамики (точнее, уравнение для переноса температуры, которое из него вытекает).

Процедура упрощения подобных систем уравнений применительно к описанию процессов в широком и непрерывном спектре атмосферных движений сводится обычно к разбиению его на детерминированную (медленно меняющийся средний поток) и стохастическую (быстро пульсирующие турбулентные возмущения) части.

В соответствии с принципом разбиения спектра на детерминированную и случайную части, могут быть получены и две системы дифференциальных уравнений. Так, для осредненных значений скорости \bar{u}_i , давления \bar{p} , и потенциальной температуры $\bar{\Theta}$ справедлива система уравнений:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_a \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_a} = -\frac{1}{\bar{p}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - g \delta_{i3} - 2\epsilon_{i\alpha\beta} \omega_\alpha \bar{u}_\beta - \frac{\partial R_{\alpha i}}{\partial x_\alpha}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\Theta}}{\partial t} + \bar{u}_a \frac{\partial \bar{\Theta}}{\partial x_a} = -\frac{\partial H_\alpha}{\partial x_\alpha}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_a}{\partial x_a} = 0, \quad (3)$$

здесь: $R_{ij} = \overline{u_i' u_j'}$ – тензор напряжений Рейнольдса, $H_j = \overline{\theta' u_j'}$ – турбулентный поток температуры (нормированный на объемную теплоемкость турбулентный поток тепла), g – ускорение сводного падения, ω_α – компоненты вектора угловой скорости вращения Земли, ρ – плотность воздуха, δ_{ij} – символ Кронекера, ϵ_{ijk} – единичный, полностью антисимметричный тензор третьего ранга. По повторяющемуся греческому индексу предполагается суммирование. Уравнения (1) и (2) записаны без учета молекулярных эффектов, а в уравнении (2) пренебрегается также притоками тепла за счет радиационных процессов и фазовых переходов. Уравнение (3) – запись уравнения неразрывности в приближении несжимаемости.

В основу численной модели турбулентной диффузии примесей положено стохастическое уравнение для координат частиц примеси $\bar{X}(t)$:

$$\frac{d \bar{X}}{d t} = \bar{u}[\bar{X}(\bar{x}_0, t), t], \quad (4)$$

где \bar{u} – вектор случайной скорости ($u_i = \bar{u}_i + u_i'$), $\bar{x}_0 \in \Omega$ – радиус-вектор начального положения частицы, причем Ω – множество точек, формирующих в совокупности источник выброса загрязняющих веществ в атмосферу произвольной конфигурации.

Вычисление R_{ij} и H_i в (1) – (3), т.е. решение проблемы замыкания, основывается в настоящей работе на использовании уравнений для одноточечных моментов турбулентных пульсаций, способ получения и последующего замыкания которых базируется на так называемой «стандартной параметризации», развитой в работах последних десятилетий (В.Е.Лаундер, 1975, 1978; J.L. Lumley 1978, 1984), и подробно описывается в разделе 2.1.

Как известно, существуют две основные принципиальные трудности использования моментных уравнений такого рода в приложениях. Первая связана с необходимостью введения дополнительных гипотез для аппроксимации вновь появившихся членов уравнений, а вторая – с требованием удовлетворения условий неотрицательной определенности общей матрицы вторых моментов:

$$c_\alpha c_\beta R_{\alpha\beta} + c_\mu c_\tau H_\mu \geq 0, \quad (5)$$

где c_i – произвольные вещественные числа. Указанное неравенство является элементарным следствием линейности оператора осреднения и определяет так называемые условия «физической реализуемости» (J.L. Lumley, 1984), включающие в качестве частных случаев такие очевидные требования, как неотрицательность квадратичных величин (например, кинетической энергии турбулентности

$b^2 = \frac{1}{2} R_{\alpha\alpha}$) или выполнения для любого из имеющихся коэффициентов корреляции условия $|\gamma| \leq 1$. Эти требования, и так весьма ограничительные, оказываются еще более значимыми при построении процедуры имитации случайного поля скорости в уравнении (4) при решении задачи турбулентной диффузии. Метод так называемой «стандартной параметризации» не гарантирует выполнения этих условий.

Для вывода моментных уравнений для R_{ij} и H_i , удовлетворяющих требованиям (5), применен специальный прием (А.С. Гаврилов, 1992), основанный на предварительном получении уравнения Фоккера-Планка в пространстве координат x_i , флуктуаций скорости u_i' ($i=1,2,3$) и флуктуаций температуры (θ') для плотности вероятности $P(u'_\alpha, \theta', x_\alpha | \bar{u}_\alpha, \bar{\theta}, t)$.

В основу способа вывода такого рода уравнения положены упрощенные (редуцированные) уравнения гидродинамики и переноса потенциальной температуры для турбулентных флуктуаций скорости и температуры, получаемые из исходных уравнений путем интегрирования по объему смещающихся в пространстве турбулентных образований с характерными пространственными масштабами L . Эти соотношения записываются, в итоге, в форме следующих стохастических уравнений:

$$\frac{dX_i}{dt} = \bar{u}_i + u'_i - W_g \delta_{i,3}, \quad (6)$$

$$\frac{du'_i}{dt} = -au'_i + \beta_i \Theta' - u'_\alpha \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_\alpha} + \frac{\partial R_{i\alpha}}{\partial x_\alpha} + \xi_i, \quad (7)$$

$$\frac{d\Theta'}{dt} = -a\Theta' - u'_\alpha \frac{\partial \bar{\Theta}}{\partial x_\alpha} + \frac{\partial H_\alpha}{\partial x_\alpha} + \xi_\theta, \quad (9)$$

где W_g – скорость гравитационного осаждения (для твердых частиц), $a = T_L^{-1}$, $T_L = c b/L$ – имеет смысл так называемого лагранжевого временного масштаба ($b^2 = 1/2 R_{\alpha\alpha}$ – средняя удельная кинетическая энергия турбулентности, c – эмпирическая константа), $\beta = g/T$ – параметр плавучести. Величины ξ_i, ξ_θ представляют собой суммы средних по внешней границе объема рассматриваемых турбулентных образований пульсаций давления (в нормировке на плотность воздуха), молекулярных потоков импульса (для ξ_i) и потоков температуры (для ξ_θ). Эти величины, как можно показать, вполне допустимо считать дельта коррелированными гауссовыми случайными числами. При расчетах они должны генерироваться датчиком случайных чисел с обязательным обеспечением для компонент матрицы их взаимных ковариаций $\overline{\xi_m \xi_n}$ ($m, n = 1, 2, 3, \theta$) выполнения соотношений, вытекающих из формул «стандартной параметризации».

Из полученного таким образом уравнения для $P(u'_\alpha, \Theta', x_\alpha | \bar{u}_\alpha, \bar{\Theta}, t)$ может быть выведена вся цепочка уравнений для односточных моментов турбулентных пульсаций произвольного порядка, при этом, частично, упрощается и процедура замыкания. Эта бесконечная система уравнений должна быть, разумеется, где-то оборвана (в данном исследовании – на уровне уравнения для третьих и, частично, четвертых моментов). Далее привлекаются упомянутые выше процедуры замыкания метода «стандартной параметризации».

Основной смысл применения описанного выше подхода в нашем исследовании состоит в том, что, во-первых, гарантируется выполнения неравенства (5), а, во-вторых, одновременно выводятся стохастические уравнения (6)-(7), непосредственно применяемые для расчета совокупности M траекторий частиц $\vec{X}_k(t)$ ($k=1, \dots, M$). На основе последующей статистической обработки результатов этого расчета и получается, в итоге, трехмерное поле осредненных значений концентрации примесей (метод статистических испытаний или «метод Монте-Карло»).

В отличие от множества описанных в литературе подходов к использованию метода Монте-Карло для описания процессов переноса и рассеяния примесей (например, J.C. Kaimal, D.A. Haugen, J.T. Newman, 1966; S.R. Hanna, 1978; J.D. Reid, 1979), используемый нами метод базируется на общей взаимно согласованной системе уравнений для моментов турбулентных пульсаций и стохастической системе уравнений для расчета траекторий частиц. Это позволяет, в итоге, предотвратить целый ряд разного рода негативных эффектов, возникающих при использовании ме-

тода Монте-Карло (например, нарушение закона сохранения массы примеси), за что эти методы вполне заслуженно критикуются.

Решение задачи расчета характеристик турбулентности, необходимых для последующей реализации процедуры расчета концентрации примеси с помощью (6)-(9) распадается здесь на две части.

На первом этапе рассматривается весь атмосферный пограничный слой (расчетная область до высоты 2 км). Уравнения для недиагональных напряжений Рейнольдса записываются при этом в так называемом «квазиравновесном» приближении, предполагающем наличие баланса между генерационными и диссипативными членами этих уравнений. В этом случае взаимосвязь турбулентных потоков и напряжений с соответствующими градиентами метеорологических величин сводится к линейной, причем с учетом сделанных предположений, такого рода коэффициенты пропорциональности (коэффициенты турбулентного обмена) для компонент горизонтальной скорости вычисляются с помощью несложных, но несколько громоздких выражений. Уравнения для диагональных компонент тензора напряжений Рейнольдса записываются, по возможности, в наиболее полном виде. Подробный анализ всех этих уравнений приведен в разделе 2.1 диссертации.

При этом решается задача об эволюции АПС с некоторого момента времени с заданием фиктивных начальных условий. В качестве нижних граничных условий привлекаются фактические данные наблюдений о скорости ветра и температуре, получаемые из данных мониторинга атмосферы. При задании верхних граничных условий предполагается затухание турбулентности на верхней границе АПС, а скорость ветра и температура – совпадающими с наблюдаемыми в свободной атмосфере.

На втором этапе решается собственно задача о восстановлении компонент скорости ветра и характеристик турбулентности в некоторой ограниченной области пространства, где турбулентный поток испытывает заметное влияние застройки с заданием, соответственно, краевых условий из результатов восстановления структуры АПС на первом этапе. Здесь уже привлекается полная система уравнений динамики атмосферы (1)-(4) вместе с замыкающими ее дифференциальными уравнениями для всех шести независимых компонент тензора напряжений Рейнольдса R_{ij} .

Для численного интегрирования уравнений здесь привлекается метод «фиктивных областей» (Г.И. Марчук, 1982; В.В. Пененко, А.Е. Алоян, 1985; А.А. Бакланов, 1987), что позволяет без значительных усложнений рассчитывать циркуляционные течения в окрестностях зданий сложной формы.

Воспроизведение в модели локальной циркуляции в окрестности каждого здания в инженерных приложениях для современного уровня вычислительной техники допустимо лишь на ограниченных пространственных областях. При этом корректный расчет возможен только для тех элементов застройки, минимальный линейный размер которых не менее чем на порядок превосходит шаг расчетной сетки.

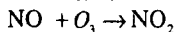
Для расширения применимости методов численного интегрирования уравнений гидротермодинамики атмосферы в подобных случаях автором разработан специальный способ численного интегрирования применительно к так называемым «тонким вертикальным ограждениям» (М.Е. Баранова, А.С. Гаврилов, 2004).

Суть метода состоит в том, что при подготовке данных для расчета, с помощью специальной вычислительной процедуры осуществляется обработка слоя за-

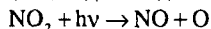
стройки векторной электронной карты таким образом, чтобы в итоге сформировать сеточные растровые массивы ряда параметров. К их числу относятся: признаки нахождения сеточных узлов внутри контура зданий, вблизи стен зданий, а также величин длин и углов нормалей к стенам зданий, опущенных из пограничных сеточных узлов. Это дает возможность выделения также и ограждений «нулевой» толщины, таких, например, как разного рода защитные акустические экраны вдоль автомагистралей, существенно влияющих, разумеется, на процессы переноса и рассеяния примеси. В разделе 2.2 диссертации подробно описаны используемые методы численной реализации гидродинамической модели применительно к расчету поля циркуляции в окрестности застройки произвольной конфигурации (в том числе и тонких ограждений), а также результаты исследований по изучению процессов по выходу решения задачи на установившийся режим обтекания.

Детальное описание реализованного способа моделирования турбулентной диффузии с использованием метода Монте-Карло, включая особенности постановки начальных условий и условий взаимодействия частиц примеси с элементами поверхности, содержится в разделе 2.3, а способы описания химической трансформации – в разделе 2.4.

Как известно, из общего количества окислов азота в выхлопных газах бензиновых двигателей в зависимости от их типа содержится 80 – 90% NO и только 10 – 20% NO_2 (Carlslaw D.C., Beevers S.D., 2005). Дальнейшая химическая трансформация оксидов азота предполагает ту или иную степень окисления NO до NO_2 , зависимой как от концентрации в атмосфере озона, так и интенсивности ультрафиолетового излучения. Основная реакция окисления оксида азота в диоксид в атмосфере – это взаимодействие его с атмосферным озоном:



Основная реакция фотодиссоциации диоксида азота:



Образующийся в реакции атомарный кислород может, в свою очередь, привести к образованию озона, который суммируется с естественным атмосферным озоном, несколько повышая при этом скорость окисления NO .

Все эти реакции могут быть сведены в единое дифференциальное уравнение, которое применительно к диоксиду азота может быть записано следующим образом (A. Venkatram, P. Karamchandani, 1994):

$$\frac{d[NO_2]}{dt} = -k_2[NO_2] + k_1[NO] * [O_3] \quad (10)$$

где квадратные скобки означают концентрацию соответствующих примесей в относительных единицах (ppm или ppb), а константы скоростей реакций рассчитываются по эмпирическим формулам в зависимости от температуры воздуха (k_1) и интенсивности солнечной радиации (k_2).

Использование (10) оказывается чрезвычайно удобным в рамках использования общей системы уравнений (6)-(9). Поскольку в рамках программы мониторинга загрязнения атмосферы города обычно измеряется и концентрация атмосферного

озона, то эту величину в уравнении (10), вследствие существенных различий в скоростях реакций (10) с одной стороны и суточной изменчивости озона с другой, можно задавать параметрически.

Наконец, в разделе 2.5 изложены предлагаемые в рамках настоящей работы методы коррекции результатов расчетов загрязнения атмосферы выбросами автотранспорта (М.Е. Баранова, 2007). Известно, что наименее достоверными и, в то же время, вносящими максимальные ошибки в результаты расчета концентрации примесей, являются данные об интенсивности движения автотранспорта. Причина этого состоит в отсутствии точной информации об его структуре, суточных, недельных и сезонных вариациях. Обычно на этот счет существуют лишь некоторые ориентировочные данные, получаемые как на основании выборочных обследований, так и последующего моделирования транспортных потоков (В.Н. Луканин, Ю.В. Трофименко, 1993). Полная ликвидация такого рода информационного дефицита возможна только вместе с созданием автоматизированной системы контроля дорожного движения, что остается делом будущего.

Именно поэтому в данном диссертационном исследовании была поставлена и решена задача корректировки результатов расчета с использованием данных тех постов мониторинга, влияние автотранспорта на которые оказывается определяющим («реперная» сеть). Для решения этой задачи вводится так называемый «корректировочный коэффициент»:

$$A_{\alpha}^{(k)} = \frac{C_{\alpha}^{(k)}}{C_k(x_{\alpha}, y_{\alpha}, z_{\alpha}, t)},$$

определяемый применительно к посту мониторинга α , располагаемому в точке (x_{α}, y_{α}) , где измеренные и рассчитанные с использованием модели значения концентрации примеси с номером k составляют, соответственно, $C_{\alpha}^{(k)}$ и $C_k(x_{\alpha}, y_{\alpha}, z_{\alpha}, t)$.

Основная проблема состоит в том, каким образом эти величины $A_{\alpha}^{(k)}$ для разных постов «реперной» сети можно использовать с целью корректировки результатов расчетов применительно ко всей территории города? Разработанная нами технология решения такой задачи базируется на том очевидном допущении, что структура и интенсивность транспорта в окрестности каждого поста мониторинга сформировались не в локальной области, а на значительной части городской территории в течение достаточно продолжительного времени. При этом может быть введена функция влияния автотранспорта категории j , движущего по различным участкам магистралей города $\Psi_j(x, y | x_{\alpha}, y_{\alpha})$ на результаты измерений концентрации примеси прибором поста мониторинга, расположенного в точке с координатами (x_{α}, y_{α}) . Эта функция представляет собой, по существу, вероятность того, что автотранспортное средство, сформировавшее в точке (x_{α}, y_{α}) отличную от нуля концентрацию примеси k , в течение времени $t < \Delta$ проходило через точку $(x, y) \in G$, где G множество участков транспортных магистралей.

Для получения такого рода функции влияния предложена некоторая упрощенная имитационная модель расчета траектории движения автотранспорта, с помощью которой последовательно рассчитываются M случайных траекторий движения каждого типа транспортного средства, стартующего в точке (x_{α}, y_{α}) , с последующим подсчетом для каждого участка среднего количества транспорта, проходя-

щего через тот или иной участок. Отношение этой величины к общему числу построенных траекторий и будет представлять собой искомую функцию. В том случае, если число постов наблюдения такого рода «реперной сети» достаточно велико (для Москвы – 12), то удается осуществить эту операцию для всей территории города и, таким образом, рассчитать уточненное по результатам мониторинга поле концентрации той или иной примеси.

Достоинством такого подхода является то, что расчетное поле концентрации примесей точно совпадает с измеренными значениями в точках расположения постов мониторинга. В остальной области это поле может рассматриваться как продукт специального типа интерполяции, где в качестве «интерполянта» выступает непосредственно численная модель переноса и рассеяния примесей в атмосфере.

Глава 3 посвящена результатам тестирования и верификации данной модели.

Как известно, под тестированием алгоритмов понимается его проверка применительно к задачам, решение которых известны (аналитические, асимптотические, тривиальные и т.п.). Под верификацией математической модели обычно понимается процедура подтверждения результатов расчетов путем сопоставления их с экспериментальными данными.

Тестирование алгоритмов модели «ГДМ+МК» включало в себя воспроизведение вертикальной структуры поля ветра и суточных колебаний температуры в условиях вертикально-однородной турбулентности с получением, в итоге, результатов, сопоставимых с известными аналитическими решениями уравнений динамики (модель Экмана-Аккерблума) и переноса тепла (модель суточных колебаний).

Как показали результаты расчетов, относительная погрешность отклонения численного результата от аналитического для модуля скорости ветра сильно зависит от параметров расчетной сетки и уже при числе уровней модели $N_z = 15-20$ оказывается менее 1%, а при $N_z = 40$ снижается до величины 0.16%.

Используемый для тестирования модели суточного хода температуры алгоритм численного интегрирования уравнения переноса тепла ориентирован на решение задач с начальными условиями (задач Коши). По этой причине получить периодическое решение здесь оказывается возможным только в результате интегрирования на несколько суток, вплоть до «выхода на периодический режим» с постановкой некоторых фиктивных начальных условий. Было выяснено, что влияние фиктивных начальных условий практически нивелируется уже через 7-10 часов развития процесса, снижаясь, в итоге, до величины около 0.5%. При этом, начиная уже со вторых суток, суточный цикл на всех высотах воспроизводится с погрешностями, не превышающими несколько сотых градуса.

Для тестирования алгоритмов, реализующих метод расчета турбулентной диффузии, привлекались хорошо подтвержденные экспериментально асимптотические следствия лагранжевой теории турбулентности (А.С. Монин, А.М. Яглом, 1992). Здесь рассмотрены два примера: процесс установившейся диффузии от плоского горизонтально-однородного источника, с получением, в итоге, логарифмического закона распределения концентрации примесей с высотой, а также процесс расширения облака примеси от мгновенного точечного источника в условиях однородной и изотропной турбулентности.

Задача состояла, в первую очередь, в исследовании сходимости расчетного профиля концентрации с увеличением числа моделируемых траекторий частиц. При этом были получены важные рекомендации по выбору оптимального числа траекторий при моделировании методом Монте-Карло процессов с различными пространственно-временными масштабами. Было получено, что для расчета характеристик загрязнения атмосферы от выбросов локализованных в пространстве источников с точностью расчета до 1% оказывается достаточно рассмотрение нескольких десятков тысяч траекторий.

Верификация модели в данной работе была ориентирована, прежде всего, на особенности именно урбанизированных территорий и проводилась на основе измерений в аэродинамических трубах (Kastner-Klein P., Plate E., Fedorovich E., 1994-1997г.г.) и результатах собственных полигонных испытаний на двух площадках: в Москве и Санкт-Петербурге.

Для верификации диффузионной модели были выбраны две конфигурации зданий - здание кубической формы (длина грани – 28 м в пересчете на натуру) и здание U-образной формы высотой $H=28\text{м}$ (в пересчете на натуру) с источником высотой 30м (в пересчете на натуру) и мощностью Q . С учетом того, что фактические профили скорости ветра и характеристик турбулентности в аэродинамической трубе вследствие более низких чисел Рейнольдса несколько отличались от наблюдаемых в атмосфере, в исходные данные для моделирования вносились соответствующие коррективы.

Такого рода расчет позволил не только оценить влияние на результат параметров численной модели (например, соотношение величины шага расчетной сетки к характерному размеру здания), но и произвести фактическое сопоставление результатов расчета с аналогичными расчетами по нескольким известным в Западной Европе моделям MISKAM, ABC, DASIM и ASMUS (рис. 1).

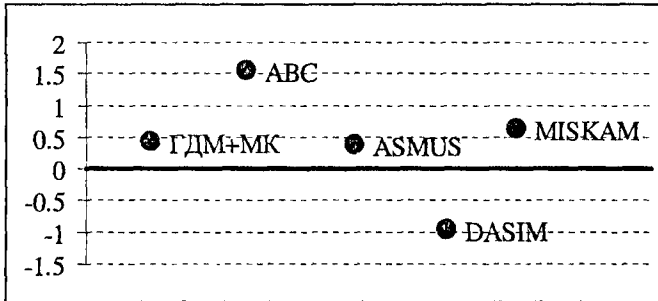


Рисунок 1 – Сопоставление результатов расчетов призматической концентрации на оси струи на расстоянии 40м (в пересчете на натуру) вниз по потоку для источника на крыше «U» образного здания по различным моделям с экспериментом (Klein P., Rau M., Rockle R., Plate, 1994). По оси ординат отложено относительное отклонение расчета и эксперимента (в долях единицы).

В качестве исходного материала для верификации модели ГДМ+МК применительно к расчету загрязнения атмосферы выбросами автотранспорта был использован фрагмент общего ряда измерений примеси «Азота диоксид» на автоматиче-

ском посту городской системы мониторинга Санкт-Петербурга (ул. Профессора Попова, 78). Анализировались результаты наблюдений с временной дискретностью 20 мин (при осреднении также за 20 мин.).

Как показали численные эксперименты, 95 % доверительные области по выборке измерений и расчетов пересекаются, поэтому на основании имеющихся коротких выборок выявить систематическую погрешность не удалось (можно лишь отметить, что она составляет не более 20 % по отношению к средней величине).

Что касается случайной ошибки, то она оказывается в этом случае около 60 %. Источники случайных ошибок здесь – это, прежде всего, использование весьма приближенных данных об интенсивности транспортных потоков, которые испытывают значительные временные вариации. Немалое значение имеют и ошибки в данных о скорости и направлении ветра (особенно для слабых ветров менее 1.5 м/с).

Численные эксперименты, проведенные для Москвы, дали похожие результаты. Анализ полученных результатов указывает на отсутствие систематической погрешности, а случайная ошибка расчета варьирует от 60% для полигона «Кутузовская развязка» до 81 % на полигоне «Ленинградский проспект». Более высокий уровень погрешностей по отношению к результатам сопоставления для Санкт-Петербурга связан, вероятно, с тем, что в первом случае в качестве данных о скорости и направлении ветра привлекались измерения непосредственно на посту мониторинга, в то время как в Москве привлекалась метеоинформация с Останкинской телебашни (ОТБ).

В главе 4 приводятся результаты применения разработанной модели к задачам охраны атмосферы урбанизированных территорий. Демонстрируются возможности созданного программного комплекса с построением, в итоге, климатических карт загрязнения атмосферы и потенциала загрязнения атмосферы высокого разрешения на примере Москвы.

Проведение комплексных расчетов связано с большим объемом получаемой информации и требует специальной организации вычислительного процесса. Для этой цели был разработан специальный программный модуль, в рамках которого реализовано хранение всех необходимых баз данных, архивация-разархивация результатов вычислений, функции тестирования и полноты базы результатов расчетов, с построением, в итоге, полей выбранной характеристики в виде ГИС-покрытий стандартного формата.

Для расчета ПЗА необходима информация о повторяемости инверсий, вероятности туманов и слабого ветра. В условиях города все необходимые вероятностные характеристики весьма изменчивы в пространстве из-за влияния на динамику атмосферы городской застройки. Особенно это касается такой характеристики, как вероятность слабого ветра ($P_{св}$). Данные о вероятности туманов могут быть получены из климатических справочников или из имеющихся метеорологических рядов, полученных со станций, входящих в сеть ВМО. Сведения о вертикальном распределении температуры, необходимые для получения вероятности инверсий, были получены из результатов измерений температуры на двух уровнях Останкинской телебашни.

Общая схема построения климатических карт ПЗА для городских условий представлена на рис. 2.

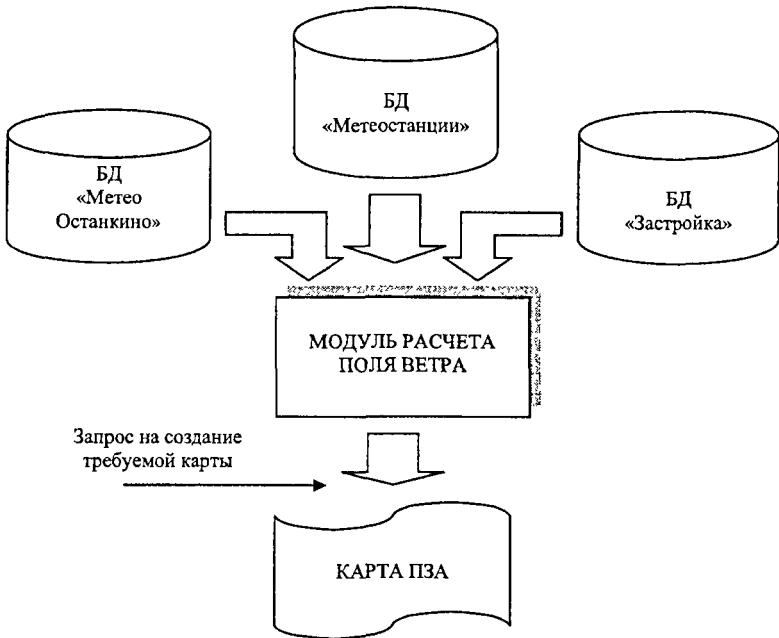


Рисунок 2 – Общая схема расчета карты потенциала загрязнения атмосферы города Москва.

На первом этапе вся необходимая для расчета информация формируются в виде трех основных типов данных:

- из информации с ОТБ формируется массив повторяемостей инверсий для разных времен осреднения, а также вероятности градаций для трех типов устойчивости, скорости (4 градации) и направления ветра (16 румбов), необходимые для проведения климатического расчета;

- по имеющимся в окрестностях города метеостанциям рассчитывается вероятность туманов и производится ее пространственная интерполяция в равномерную сетку, в узлах которой в дальнейшем будет производиться расчет поля ветра, и, в итоге, значений ПЗА;

- информация о городской застройке, представленная в виде ГИС-покрытий, содержит геометрическую информацию об объектах и их высоту.

Далее для выбранной области производится циклический расчет полей скорости ветра для всех градаций.

После проведения всех необходимых предварительных операций вся информация синтезируется в поле потенциала загрязнения с пространственным разрешением, определяемым заданием упомянутого выше поля вероятности слабого ветра $P_{сн}(x, y, z_f)$.

Общая схема расчета климатической карты загрязнения атмосферы Москвы выбросами автотранспорта предусматривает два основных этапа (рис. 3).

На первом этапе осуществляется предварительный расчет и накопление в специальном архиве индивидуальных факелов от каждого участка автомагистрали, внесенного в базу данных (около 30 тысяч участков), при заданном единичном погонном выбросе некоторой условной газообразной примеси (1г/с с 1 км трассы).

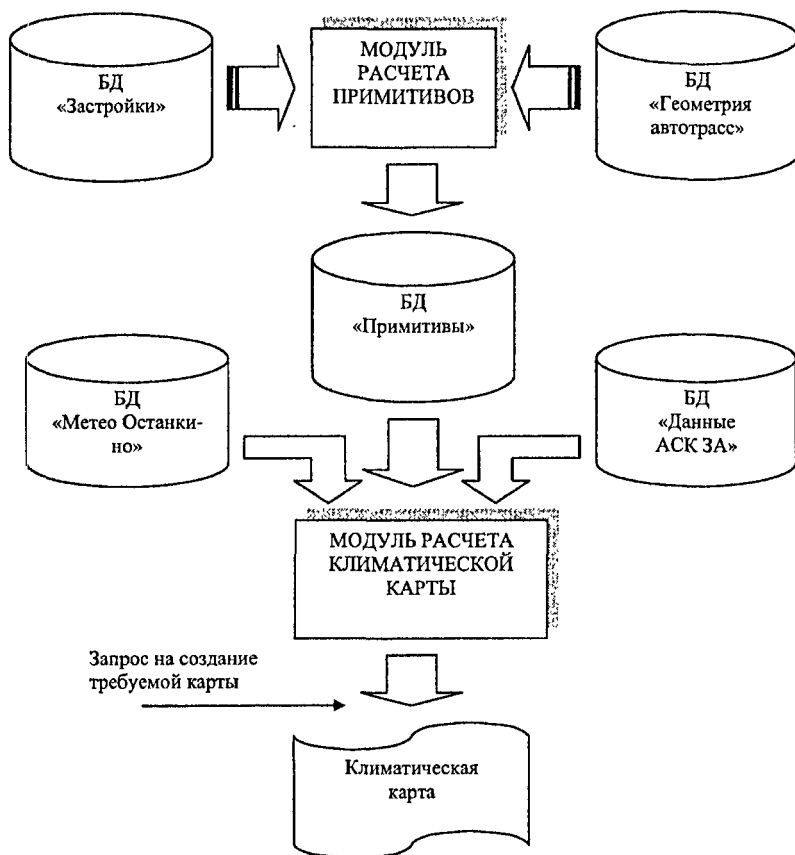


Рисунок 3 – Блок-схема планирования и проведения расчетов климатической карты загрязнения.

Расчет осуществляется для каждого из 16 направлений (румбов), 4-х градаций скорости ветра и 3-х категорий устойчивости атмосферы (устойчивая, нейтральная, неустойчивая стратификация). В результате создается так называемая БД «Примитивов» - трехмерных полей концентрации примеси от выбросов единичного источника с каждого конкретного участка автомагистрали (из более чем 30 тысяч рассматриваемых) для всех указанных выше градаций метеоусловий.

На втором этапе с использованием «модуля расчета климатической карты» производится собственно климатическая обработка. При этом задание на расчет конкретизирует:

- тот или иной вариант базы данных интенсивностей движения с каждой магистрали;
- спецификацию постов Автоматизированной Системы Контроля Загрязнения Атмосферы (АСКЗА) «реперной» сети города Москва;
- графы корректировочных коэффициентов, метод расчета которых приведен в разделе 2.5;
- уточненный вариант базы данных статистических характеристик поля ветра;
- тот или иной вариант методики расчета выбросов;
- выбранный участок города и высоту интересующего уровня (этаж);
- указанный набор статистических характеристик (среднегодовые, среднесезонные, средние в часы пик для заданного сезона, максимальные в часы пик и т.д.).

Для достижения требуемого разрешения, позволяющего учитывать при расчете климата влияние на распространение примесей зданий и сооружений, весь город разбивается на элементарные площадки:

- области регистрации ($8*8=64$) размером $1600*1600\text{м}^2$ для которой фиксируется поле примеси в сетке $400*400$ с числом уровней 20 для каждого участка авто-трассы из области расчета;
- области расчета ($5*5=25$) размером $2560*2560\text{м}^2$, обрамляющие область регистрации для минимизации влияния граничных эффектов;

На рисунке 4а) приведен пример построения листа карты для потенциала загрязнения в среднем за год. Расчеты по численной модели осуществлялись здесь с пространственным разрешением 5 м, поэтому из-за влияния на динамику потока застройки поле ПЗА оказывается весьма пестрым. На свободных от застройки территориях величина ПЗА оказывается около 2.0, что согласуется в пределах 15 % со значениями этой величины, получаемыми в качестве фоновых. Что касается микрорайонов с застройкой, то здесь, как можно видеть из рисунка, значения ПЗА варьируют в пределах 2.4-2.8, причем максимальные значения – около 3.0, наблюдаются в микрорайонах с плотной застройкой.

На рисунке 4б) приведен пример расчетного листа карты среднегодовых приземных концентраций примеси «Азота диоксид». Как можно видеть из рисунка, на оси трассы наблюдаются значительные величины концентрации примеси, превышающие предельно-допустимые значений в несколько раз. При удалении от полотна магистрали происходит резкое падение значений. Для сильно напряженных магистралей поле загрязнения оказывается весьма протяженным, накрывая прилегающие кварталы. Районы с малоэтажной застройкой, высокой плотностью улично-дорожной сети (УДС) с относительно низкой транспортной нагрузкой отличаются значительно меньшим загрязнением. Здесь наблюдаются незначительные максимумы значений концентрации над дорожным полотном и на перекрестках. Затекание вглубь застройки незначительно. При особо плотной УДС области загрязнения от отдельных участков сливаются, образуя сплошное поле загрязнения.

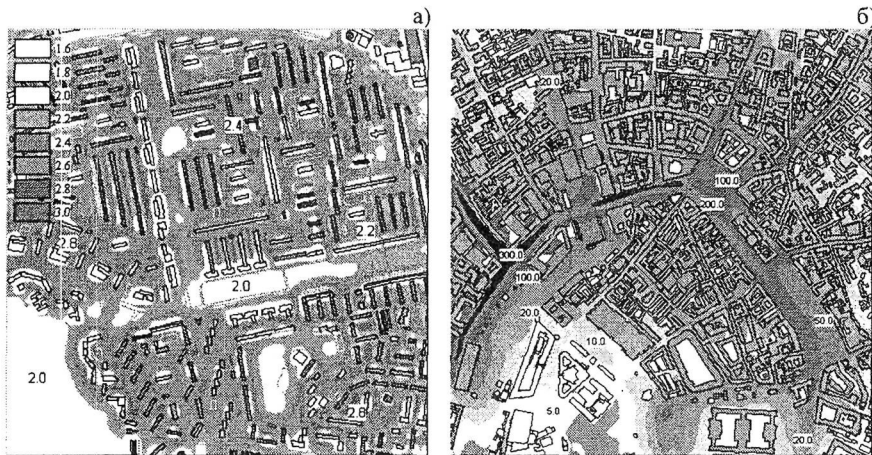


Рисунок 4 – Результаты расчетов.

а) Лист расчетной карты потенциала загрязнения; б) Результат построения среднегодовой карты загрязнения атмосферы города выбросами примеси «Азота диоксид», мкг/м^3 (размер карт $1600 \times 1600 \text{ м}^2$).

В настоящее время завершены все расчеты и полученные локальные карты среднегодовых суммарных концентраций оксидов азота синтезированы в единое ГИС-покрытие для всей территории Москвы ($40 \times 40 \text{ км}$), которое входит в настоящее время в состав электронного Экологического Атласа Москвы, создаваемого на протяжении ряда лет ГПУ «Мосэкомониторинг» и широко используемого в настоящее время для принятия управленческих решений по регулированию автотранспортных потоков города. Основные карты этого атласа в ближайшее время будут доступны для просмотра через «Интернет».

В Заключение сформулированы основные результаты и выводы.

1. В составе модели ГДМ+МК разработан и апробирован метод расчета переноса и рассеяния примесей в атмосфере в окрестности тонких (толщиной менее шага расчетной сетки) элементов подстилающей поверхности. Этот метод позволяет производить расчет полей скорости ветра и характеристик турбулентности с пространственным разрешением в несколько метров для урбанизированных территорий площадью в десятки квадратных километров с полным воспроизведением вихревой циркуляции в окрестности каждого здания.

2. На основе проведения комплексного тестирования и верификации модели ГДМ+МК применительно к расчету полей скорости ветра и концентрации на основе натуральных измерений и результатов измерений в аэродинамических трубах, оценены полные погрешности расчета характеристик загрязнения за счет влияния как погрешностей исходных данных, так и неточностью модели.

3. Для минимизации погрешностей расчета вследствие неточности исходных данных об интенсивности движения автотранспорта разработан и апробирован метод коррекции результатов расчета полей концентрации на основе использования измерений на постах городской системы мониторинга загрязнения атмосферы.

4. Впервые в природоохранной практике произведен расчет потенциала загрязнения атмосферы с учетом влияния на поле ветра застройки города с высоким пространственным разрешением для всей территории большого города (на примере Москвы).

5. Предложена и реализована технология расчета климатических карт характеристик загрязнения урбанизированной территории с высоким пространственным разрешением от выбросов автотранспорта, на основании которой впервые рассчитана детальная карта среднегодовых характеристик загрязнения большого города (на примере Москвы).

Основные публикации по теме диссертации.

Статьи в изданиях из списка ВАК

1. Методы расчетного мониторинга загрязнения атмосферы мегаполисов // Естественные и технические науки. М., 2008. № 4. с. 221–225 (соавтор Гаврилов А.С).
2. Информационное сопряжение результатов расчетов и измерений для создания карт загрязнения атмосферы городов // Научно-технические ведомости. Изд. СПбГПУ, вып. 4-2(52), 2007, с. 66-69.

Статьи в научно-технических сборниках

3. Численное моделирование динамики обтекания турбулентным потоком тонких вертикальных ограждений // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: Межвуз. темат. сб. тр. Вып. 10 / СПбГАСИ. – СПб, 2004, с. 85-94 (соавтор Гаврилов А.С).
4. Численное моделирование загрязнения атмосферы выбросами автотранспорта в окрестности городских транспортных развязок // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: Межвуз. темат. сб. тр. Вып. 10 / СПбГАСИ. – СПб, 2004, с. 94-99 (соавторы Гаврилов А.С., Андрианов В.А., Воронов Г.И.).

Публикации в материалах конференций

5. Метод расчета карт потенциала загрязнения атмосферы города москвы и его окрестностей // Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон. Международная научная конференция 25-27 мая 2005. Материалы конференции / СПб.: изд. РГТМУ, 2005. с. 13-14. (соавторы Гаврилов А.С., Мханна А.).

7. Численная модель применительно к расчету климатического режима загрязнения города выбросами автотранспорта. Материалы итоговой сессии ученого совета 25-26 января 2005 г. Информационные материалы. Часть II. Секция океанологии, экологии и физики природной среды. – СПб.: изд. РГГМУ, 2005. с. 33-35. (соавтор Гаврилов А.С).
8. Численное моделирование загрязнения атмосферы крупных городов и промышленных зон с использованием гидротермодинамических моделей. // Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон. Международная научная конференция 25-27 мая 2006. Материалы конференции / СПб.: изд. РГГМУ, 2006. с. 66-67 (соавторы Гаврилов А.С., Воронов Г.И., Савватеева Л.А.).
9. Математическое моделирование загрязнения атмосферы выбросами автотранспорта в окрестности городских транспортных развязок сложной конфигурации // Материалы итоговой сессии Ученого совета 27-28 января 2004 г. Информационные материалы. Часть II. Секция океанологии, экологии и физики природной среды. – СПб.: изд. РГГМУ, 2004. с. 98-100 (соавторы Андрианов В.А., Воронов Г.И. Гаврилов А.С).
10. Информационная система статистической обработки и визуализации данных, получаемых с автоматических станций контроля загрязнения атмосферы // Итоговая сессия Ученого совета. 25-26 января 2006. Тезисы докладов / СПб.: изд. РГГМУ, 2006, с. 82-83 (соавторы Гаврилов А.С., Савватеева Л.А.).

