

На правах рукописи



Панасенко Елена Александровна

**Численное решение обратных задач переноса примеси
на многопроцессорных вычислительных системах**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2010

Работа выполнена на кафедре вычислительной математики и компьютерного моделирования механико-математического факультета ГОУ ВПО «Томский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Старченко Александр Васильевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Тимченко Сергей Викторович

доктор физико-математических наук,
профессор
Нагорский Петр Михайлович

Ведущая организация: Институт вычислительной математики
и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск

Защита состоится 29 апреля 2010 г. в 10:30 на заседании диссертационного совета Д 212.267.08 при ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г.Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г.Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан 19 марта 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



А.В. Скворцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время проблема охраны окружающей среды становится одной из важных задач науки, что связано с возрастающими темпами технического прогресса во всех странах мира. Ухудшение качества атмосферного воздуха происходит вследствие выбросов в атмосферу отходов промышленных предприятий и выхлопных газов автотранспорта, что приводит к ухудшению здоровья населения, а в глобальном масштабе – к изменению климата на планете.

Избежать поступления загрязняющих веществ в атмосферу невозможно, но постоянный контроль качества воздуха позволит обеспечить безопасный уровень воздействия на атмосферу. Одним из способов оценки уровня загрязнения воздуха является контроль интенсивности выбросов вредных веществ с помощью постов наземных наблюдений. Но даже разветвленная сеть таких пунктов наблюдения не всегда может предоставить достоверную информацию для природоохранных служб. Большую помощь здесь может оказать применение методов математического моделирования и, особенно, технологий численного решения обратных задач по определению характеристик источников загрязнения.

Но сложность процессов распространения примеси делают модели оценки качества воздуха громоздкими и требовательными к вычислительным ресурсам. Перспективным способом решения этих проблем является использование высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем, которые обеспечивают существенное ускорение получения результатов расчетов и повышение качества численного прогноза. Развитие же многопроцессорных вычислительных систем, в свою очередь, непосредственно связано с успехами вычислительной математики. Поэтому к числу важнейших работ по развитию параллельных вычислительных технологий следует отнести: создание новых методов и алгоритмов, ориентированных на эффективное использование многопроцессорных вычислительных систем, и разработку оригинального программного обеспечения с высокими показателями масштабируемости.

Математическому моделированию загрязнения атмосферного воздуха и решению обратных задач переноса примеси посвящены работы М.Е. Берлянда, Г.И. Марчука, В.В. Пененко, А.Е. Алояна, Р.Д. Борнштейна, Ф.Т.М. Ньистадта, Х. Ван Допа, М. Uliasz, Н. Mayer, N. Moussiopoulos, а также работы группы сотрудников НИИ аэробиологии ГНЦ ВБ «Вектор» (А.И. Бородулин, Б.М. Десятков, С.С. Котлярова и др.). Параллельному программированию и методам распараллеливания численных алгоритмов много внимания уделено в работах В.В. Воеводина, Вл.В. Воеводина, В.Э. Малышкина, В.А. Вшивкова, В.В. Корнеева, М.А. Толстых, Р. Хокни, К. Джессхоуп, D. Dubdub, Н. Meuer и др.

Целью диссертационной работы является разработка нового метода параллельных вычислений для решения обратных задач переноса примеси на многопроцессорных вычислительных системах и его апробация для реальных городских условий.

Для достижения данной цели поставлены и решены следующие **основные задачи**:

1. Построение математической модели обратной задачи, описывающей перенос газообразной примеси.

2. Разработка численного метода решения обратных задач переноса примеси, опирающегося на использование сопряженных уравнений и двойственное представление функционала концентрации примеси и предназначенного для детальной идентификации основных районов – загрязнителей атмосферного воздуха в городе.

3. Теоретическое исследование свойств разностных схем для решения сопряженных к адвективно-диффузионным уравнениям.

4. Разработка параллельной реализации вычислительных алгоритмов и её апробация для некоторых обратных задач переноса примеси в условиях г.Томска с целью определения источников загрязнения, находящихся на городской территории.

Научная новизна полученных автором результатов заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель обратной задачи переноса примеси для идентификации параметров источников загрязняющих веществ, которая опирается на уравнения, сопряженные к уравнению турбулентной диффузии, и двойственное представление функционала от концентрации примеси. Модель является многокритериальной, так как она учитывает пространственный и нестационарный характер изменения концентрации примеси за счет адвекции, турбулентного рассеяния, сухого и влажного осаждения, шероховатость поверхности и растительность, что позволяет достаточно точно описывать процессы, происходящие в окружающей среде.

2. Создана модификация численного метода Марчука¹ решения обратных задач для определения городских районов – загрязнителей атмосферного воздуха, заключающаяся в преобразовании двойственного представления функционала концентрации примеси в дополнительные условия для оперативной количественной оценки интенсивности поступления примеси от различных районов города. Это преобразование позволяет весь вычислительный процесс представить в виде последовательности двух отдельных этапов, что существенно упрощает решение обратной задачи.

3. Создан алгоритм численного решения сопряженных уравнений, которые лежат в основе обратной задачи переноса примеси, с использованием явных и явно-неявных разностных схем. Применение таких схем по сравнению с методами покоординатного расщепления имеет преимущество по быстродействию и возможности более эффективного распараллеливания. Теоретически доказано, что построенные разностные схемы аппроксимируют дифференциальную задачу на точном решении, условно устойчивы и сходятся.

4. Разработан новый метод параллельных вычислений для решения обратных задач переноса примеси, опирающийся на использование комбинации

¹ Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М., 1982. 315 с.

функциональной и геометрической декомпозиции. Предложенный метод численного решения обратных задач переноса примеси на многопроцессорных вычислительных системах позволяет существенно (на порядок) увеличить количество используемых процессоров по сравнению с функциональной или геометрической декомпозицией и тем самым значительно сократить время счета.

Теоретическая значимость работы заключается в существенном продвижении в теории методов параллельных вычислений и методов решения обратных задач, а именно в создании метода параллельной реализации решения обратных задач переноса примеси, позволяющего значительно увеличить ускорение выполнения параллельной программы, а также в создании метода определения параметров источников загрязнения городского воздуха.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные в диссертационной работе математические модели и параллельные алгоритмы могут использоваться в реальных условиях для контроля качества атмосферного воздуха над урбанизированными территориями и обнаружения районов города и расположенных на них предприятий, существенно влияющих в текущий момент времени на уровень загрязнения приземного воздуха.

Разработанные в диссертации модели, алгоритмы и программы используются в созданном в рамках проекта РНП.2.2.3.2.1569 аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 годы)” расчетно-программном комплексе для обучения по вопросам обеспечения безопасности жизнедеятельности в чрезвычайных ситуациях на основе современных информационно-образовательных технологий (<http://mchs.tsu.ru>).

Материалы проведенных исследований включены в программу специального курса лекций, читаемого на механико-математическом факультете ТГУ.

Обоснованность научных положений и выводов, сделанных в диссертационной работе, следует из адекватности используемых физических и математических моделей, численных методов, что подтверждается сравнением с результатами экспериментов, а также с известными теоретическими данными других авторов.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель обратной задачи переноса газообразной примеси.
2. Модификация численного метода Марчука решения обратных задач для определения городских районов – загрязнителей атмосферного воздуха.
3. Явные и явно- неявные разностные схемы, применяемые для численного решения сопряженных уравнений, и их теоретическое исследование.
4. Метод параллельных вычислений для решения обратных задач переноса примеси, опирающийся на использование комбинации функциональной и геометрической декомпозиции, и результаты идентификации городских районов – загрязнителей атмосферного воздуха.

Личный вклад автора: Панасенко Е.А. под руководством профессора Старченко А.В. принимала участие в разработке численного метода решения обратных задач переноса примеси, разработке алгоритма численного решения

сопряженных уравнений, создании и применении параллельных алгоритмов для численного решения обратных задач переноса примеси; осуществила тестирование разработанных методов для определения городских районов – загрязнителей приземного воздуха; самостоятельно получила основные результаты диссертационной работы и провела их обоснование.

Основные результаты диссертации доложены соискателем на 5-ти международных и 5-ти Всероссийских конференциях в Алуште, Новороссийске, Томске и полностью представлены в следующих опубликованных работах [1-8], в том числе в 1 статье в изданиях списка ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения; общий объем работы – 138 страниц; работа содержит 12 таблиц и 29 рисунков; список цитируемой литературы включает 157 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основные цели и задачи. Подчеркнута научная новизна и практическая значимость работы. Перечислены положения, выносимые на защиту, дано краткое изложение содержания диссертационной работы по главам.

Первая глава посвящена проблеме загрязнения воздуха антропогенными выбросами, влиянию атмосферных процессов на перенос примеси, а также способам их математического моделирования. На основании литературных источников приведены системы дифференциальных уравнений, описывающие перенос газообразной примеси. Указаны особенности, связанные с переходом к сопряженным уравнениям, которые лежат в основе постановок обратных задач переноса примеси. Подробно рассматриваются существующие численные методы решения прямых и обратных задач переноса примеси и дан обзор существующих параллельных алгоритмов решения таких задач. В заключительной части главы делаются выводы о том, что для решения обратных задач переноса примеси удобно использовать подход Г.И. Марчука и целесообразно применять высокопроизводительную вычислительную технику.

Вторая глава представляет физические формулировки и математические постановки прямой и обратной задач переноса примеси.

Обратная задача переноса примеси формулируется следующим образом: требуется по известным метеорологическим данным атмосферы и результатам измерений концентрации газообразной примеси в N точках, проводимых в течение некоторого периода времени T , определить параметры (мощность, координаты и время срабатывания) источников примеси.

Математическая постановка обратной задачи записывается с использованием сопряженных уравнений. Для этого адвективно-диффузионное уравнение переноса примеси умножается на функции $C_k^*(t, x, y, z)$ и интегрируется по времени и пространству. После некоторых математических преобразований получаются сопряженные уравнения:

$$\begin{aligned}
& -\frac{\partial C_k^*}{\partial t} - \frac{\partial UC_k^*}{\partial x} - \frac{\partial VC_k^*}{\partial y} - \frac{\partial WC_k^*}{\partial z} + \sigma C_k^* - \frac{\partial}{\partial x} \left[\Gamma \frac{\partial C_k^*}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\Gamma \frac{\partial C_k^*}{\partial y} \right] - \\
& - \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial C_k^*}{\partial z} \right] = P_k; \quad k = 1, \dots, N,
\end{aligned} \tag{1}$$

начальные и граничные условия:

$$C_k^*(T, x, y, z) = 0; \tag{2}$$

$$x = 0 : UC_k^* + \Gamma \frac{\partial C_k^*}{\partial x} = 0; \quad x = L_x : UC_k^* + \Gamma \frac{\partial C_k^*}{\partial x} = 0;$$

$$y = 0 : VC_k^* + \Gamma \frac{\partial C_k^*}{\partial y} = 0; \quad y = L_y : VC_k^* + \Gamma \frac{\partial C_k^*}{\partial y} = 0;$$

$$z = 0 : K_z \frac{\partial C_k^*}{\partial z} = \alpha C_k^*; \quad z = L_z : \frac{\partial C_k^*}{\partial z} = 0,$$

где U, V, W – компоненты соленоидального вектора скорости атмосферного воздуха, Γ, K_z – коэффициенты турбулентной диффузии, σ – интенсивность влажного осаждения (вымывания осадками) примеси,

$P_k = \delta(x - x_k) \delta(y - y_k) \delta(z - z_k) \delta(t - t_k)$, $k = 1, \dots, N$; N – количество измерений концентрации $\{C_k\}$, α – скорость сухого осаждения примеси; а также двойственное представление функционала от концентрации примеси:

$$\begin{aligned}
J(C) &= \int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} CP_k dz dy dx dt = C_k = \int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C_k^* Q dz dy dx dt + \\
&+ \int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} C_k^* \Big|_{z=0} R dy dx dt, \quad k = 1, \dots, N.
\end{aligned} \tag{3}$$

Здесь Q – интенсивность поступления примеси от M рассматриваемых высотных источников, $Q = \sum_{j=1}^M Q_j(t) \delta(x - x_j^0) \delta(y - y_j^0) \delta(z - z_j^0)$, $Q_j(t)$ – расход выброса из источника с координатами x_j^0, y_j^0, z_j^0 , $R = R(t, x, y)$ – интенсивность поступления примеси от наземных источников.

Решение (1)-(2) и (3) позволит установить параметры источника загрязнения атмосферного воздуха. Используемые в (1)-(2) метеорологические величины рассчитываются на основе разработанной в ТГУ и ИОА СО РАН мезомасштабной метеорологической модели².

В **третьей главе** представлены численные методы решения сформулированных в главе 2 задач. Дискретизация дифференциальных уравнений модели переноса примеси осуществлена с использованием метода конечного объема на основе явных и явно-неявных разностных схем. Для аппроксимации адвективных членов использовались: противопотоковая схема, схема MLU Ван Лира или

² Старченко А.В. Численное исследование локальных атмосферных процессов // Вычислительные технологии. 2005. № 10, ч. 2. С. 81–89.

схема Ботта³. Доказано, что все рассматриваемые разностные схемы аппроксимируют дифференциальную задачу и условно устойчивы по начальным данным.

Для тестирования полученных разностных схем рассматривались прямые двумерные задачи переноса газообразной примеси, поступающей от точечного источника постоянной мощности или от мгновенного точечного источника.

На рисунке 1 представлены профили концентрации примеси, поступающей от точечного источника мощностью $Q_0 = 1000 \text{ г/с}$ в сечении, поперечном основному потоку, полученные с использованием противопотоковой схемы, схемы MLU Ван Лира и схемы Ботта. Точное решение и решение, полученное при использовании схем Ботта и MLU изображены одной линией, так как практически полностью совпадают. Поле ветра имеет постоянные и равные компоненты ($U = V = 1/\sqrt{2} \text{ м/с}$), турбулентная диффузия $\Gamma = 1 \text{ м}^2/\text{с}$, размеры области $L_x = L_y = 180 \text{ м}$, положение источника $x_0 = 0.25L_x$, $y_0 = 0.25L_y$.

Наиболее точные результаты дает применение схемы Ботта и схемы MLU.

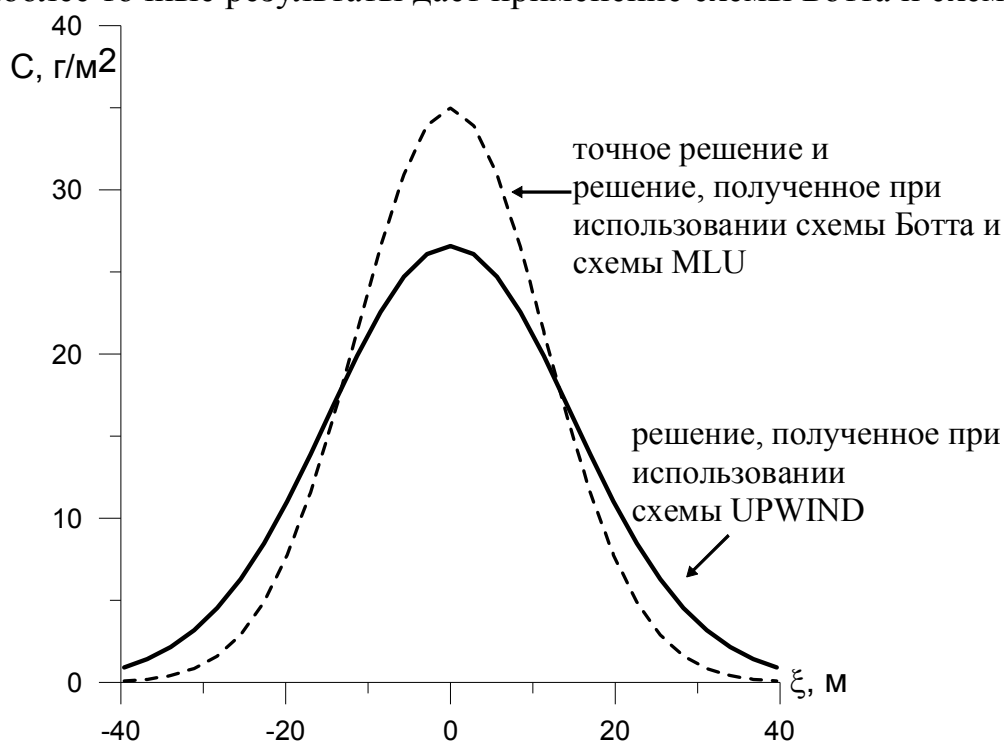


Рисунок 1 – Сравнение разностных схем с аналитическим решением при моделировании переноса примеси от источника постоянной мощности

В четвертой главе описана параллельная реализация разработанной вычислительной процедуры решения системы адвективно-диффузионных уравнений (1)-(2) на многопроцессорной системе с распределенной памятью. В работе применена функциональная и геометрическая декомпозиции и предложен комбинированный способ.

При использовании функциональной декомпозиции распараллеливание метода численного решения обратной задачи переноса примеси производится с

³ Ривин Г.С., Воронина П.В. Перенос аэрозоля в атмосфере: выбор конечно-разностной схемы // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10, № 6. С. 623–633.

использованием принципа «master-slave». В этом случае управляющий master-процесс с частотой ω передает каждому slave-процессу значения метеорологических параметров, необходимые для решения сопряженных задач. Подчиненные slave-процессы, получив данные, в свою очередь, ведут расчеты независимо друг от друга, и найденные на каждом шаге по времени приближенные решения своей сопряженной задачи (1)-(2) возвращают управляющему процессу, который ищет глобальный минимум функционала

$$J(C) = \sum_{k=1}^N \left(\int_0^{T L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C_k^* Q dz dy dx dt + \int_0^{T L_x} \int_0^{L_y} C_k^* \Big|_{z=0} R dy dx dt - C_k \right)^2,$$

позволяющий определить параметры источников загрязнения.

В работе теоретически и экспериментально исследовано ускорение и эффективность данного параллельного алгоритма для задачи идентификации параметров мгновенного источника. Теоретические оценки можно записать следующим образом:

$$S_p^{\Phi 1} \approx \frac{p-1}{1 + \frac{5\chi \cdot \omega}{m}}, E_p^{\Phi 1} = \frac{S_p}{p} \approx \frac{1-1/p}{1 + \frac{5\chi \cdot \omega}{m}}. \quad (4)$$

Здесь p – число используемых процессов, m – число арифметических операций для вычисления одного значения сеточной функции, χ – отношение времени межпроцессорной передачи одного числа к времени арифметической операции.

При таком способе организации параллельных вычислений не удастся достичь идеального параллелизма. Это связано с тем, что master-процесс не решает отдельную сопряженную задачу. Поэтому с целью повышения эффективности алгоритма рассматривается другой подход, в котором master-процесс дополнительно к своей работе также решает одну из N сопряженных задач (1)-(2).

В этом случае теоретическая оценка ускорения и эффективности может быть записана следующим образом:

$$S_p^{\Phi 2} \approx \frac{p}{1 + \frac{5\chi \cdot \omega}{m}}, E_p^{\Phi 2} \approx \frac{1}{1 + \frac{5\chi \cdot \omega}{m}} \quad (5)$$

и разработанная параллельная программа будет иметь более высокие показатели по времени выполнения.

Для подтверждения теоретических оценок был проведен ряд расчетов на кластере ТГУ СКИФ Cyberia (таблица 1).

Таблица 1 – Время счета (сек) для функциональной декомпозиции

Количество изменений, N	Число процессов (вариант Ф1)	Время счета (вариант Ф1)	Число процессов (вариант Ф2)	Время счета (вариант Ф2)
5	6	312	5	323
10	11	316	10	337
20	21	322	20	354

Из таблицы видно, что оба рассматриваемых варианта имеют высокие показатели масштабируемости, что выражается в слабом изменении времени счета при добавлении процессорных элементов и увеличении размера задачи. Однако первый вариант функциональной декомпозиции имеет небольшое преимущество во времени выполнения параллельной программы.

В диссертационной работе также при решении сопряженных задач (1)-(2) использовалась одномерная (вдоль оси OY) геометрическая декомпозиция сеточной области.

Теоретические оценки ускорения и эффективности параллельного алгоритма в этом случае имеют следующий вид:

$$S_p^\Gamma \approx \frac{p}{1 + \frac{\chi}{m} \left(\frac{5\omega}{N} + \frac{4p}{N_x} \right)}, E_p^\Gamma = \frac{S_p^\Gamma}{p} \approx \frac{1}{1 + \frac{\chi}{m} \left(\frac{5\omega}{N} + \frac{4p}{N_x} \right)}, \quad (6)$$

где N_x – размер вычислительной сетки по оси Ox , N – количество решаемых сопряженных задач.

Поскольку в полученной оценке эффективности рассматриваемого способа распараллеливания вклад межпроцессорной передачи данных во временные затраты более значительный, стоит ожидать, что применение геометрической декомпозиции при решении обратных задач переноса примеси, в которых на каждом шаге по времени требуется передача данных master-процессу, менее перспективно, чем использование функциональной декомпозиции. Такие выводы подтвердились экспериментально (таблица 2).

Таблица 2 – Время счета для геометрической декомпозиции

Количество измерений, N	Число используемых процессов, p	Время, сек
5	5	627
10	10	643
20	20	743

Сопоставляя результаты, приведенные в таблицах 1 и 2 видно, что применение геометрической декомпозиции для рассматриваемой задачи идентификации параметров внезапного выброса в атмосферу существенно (более, чем в два раза) уступает по быстродействию функциональной декомпозиции.

В данной работе был предложен комбинированный способ распараллеливания с целью увеличения в расчетах числа используемых активных процессов, количество которых ограничено при функциональной и геометрической декомпозиции. В комбинированном подходе все p активных процессов делятся на N групп (по числу измерений), каждая из которых решает численно одну сопряженную задачу (1),(2), используя одномерную геометрическую декомпозицию. Для получения приближенного решения процессы отдельной группы обмениваются между собой рассчитанными значениями сеточной функции вблизи границ подобластей. Поиск минимума функционала выполняет один из p процессов, которому остальные передают результаты промежуточных расчетов.

Теоретические оценки такого способа параллельной реализации записываются в следующем виде:

$$S_p^{\text{комб}} \approx \frac{p}{1 + \frac{\chi}{m} \left(5\omega + \frac{4p}{N \cdot N_x} \right)}, E_p^{\text{комб}} = \frac{S_p^{\text{комб}}}{p} \approx \frac{1}{1 + \frac{\chi}{m} \left(5\omega + \frac{4p}{N \cdot N_x} \right)}. \quad (7)$$

Сравнивая оценки параллельных реализаций (6) и (7) можно отметить, что эффективность комбинированного подхода не хуже, чем при геометрической декомпозиции, однако количество используемых активных процессов можно увеличить на порядок, что при имеющей место масштабируемости параллельной версии алгоритма приведет к значительному сокращению времени счета.

Результаты вычислительных экспериментов подтвердили теоретические оценки (таблица 3).

Таблица 3 – Время счета для комбинированного метода распараллеливания

Количество измерений, N	Время счета последовательной программы, сек	Число процессов	Время счета параллельной программы, сек
5	1626	100	33
10	3922	200	42
20	7799	400	59

Стоит отметить, что комбинированный подход на порядок позволяет увеличить число используемых процессов и снизить время счета, при этом эффективность параллельной программы остается на уровне не менее 50%. Однако, в целом, функциональная декомпозиция имеет существенное преимущество, судя по (5), (6) и (7).

В **пятой главе** представлены модификация метода Г.И. Марчука и результаты её апробации для обратных задач переноса примеси на примере г. Томска с целью определения городских районов – загрязнителей атмосферного воздуха.

Математическая постановка задачи по определению городских районов – загрязнителей воздуха по измеренным значениям концентрации примеси состоит из (1)-(2) и поиска распределения $\bar{Q}(x, y)$, которое определяется из требования минимума следующего функционала:

$$\sum_{k=1}^N \left[\int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \left(\int_0^{TL_z} C_k^* dz dt \right) \bar{Q}(x, y) dy dx - C_k \right]^2, \bar{Q}(x, y) \geq 0. \quad (8)$$

Здесь $\bar{Q}(x, y) = \int_0^T \left(\int_0^{L_z} C_k^* Q dz + C_k^* \Big|_{z=0} R \right) dt / \int_0^T \int_0^{L_z} C_k^* dz dt$ – интенсивность источников примеси (наземных и приподнятых) в точке (x, y) .

Сопряженные задачи (1), (2) решаются численно с помощью метода конечного объема и разностных аппроксимаций на равномерной сетке. Используя

квадратурные формулы прямоугольников при вычислении интегралов, входящих в (8), получим следующую задачу:

$$\Phi(\bar{Q}_{1,1}, \bar{Q}_{1,2}, \dots, \bar{Q}_{N_x, N_y}) = \sum_{k=1}^N \left(\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} a_{i,j}^k \bar{Q}_{i,j} S_{i,j} - C_k \right)^2 \rightarrow \min, \quad (9)$$

при $\bar{Q}_{i,j} \geq 0, i = 1, \dots, N_x, j = 1, \dots, N_y$.

Здесь $a_{i,j}^k \approx \left(\int_0^T \int_0^{L_z} C_k^* dz dt \right)_{i,j} \geq 0$ и $\bar{Q}_{i,j}$ есть приближенная оценка выбросов

примеси в столбе воздуха над (i, j) -м конечным объемом площадью S_{ij} .

В итоге разработанный метод решения обратных задач по обнаружению основных городских районов – загрязнителей заключается в составлении на основе решения (1) и (2) функционала концентрации примеси с неизвестными источниками выбросов примеси, использовании суперкомпьютеров и применении библиотечных функций решения многомерных экстремальных задач с ограничениями. Так, для решения такой задачи в данной работе на основе сравнительного анализа программ Библиотеки численного анализа НИВЦ Московского государственного университета на тестовых и реальных задачах был выбран метод сопряженных градиентов.

При решении рассматриваемой задачи идентификации характеристик городских источников загрязнения в качестве входных параметров использовались результаты измерений концентраций монооксида углерода, проводимых трижды в день на пяти постах наблюдения, расположенных в г. Томске. При моделировании рассматривался период времени, охватывающий двое суток (7-8 сентября 2000 года), следовательно, количество измерений, необходимых для решения обратной задачи, составляет $N = 30$. Область исследования имеет площадь размером 50×50 км, в ее центральной части находится городская территория. Верхняя граница расчетной области располагается на высоте 1000 м, расчетная сетка: $100 \times 100 \times 60$ ячеек.

На рисунке 2 представлены рассчитанные изолинии интенсивности $\bar{Q}(x, y)$ поступления CO в различных районах города в течение 7-8 сентября 2000 г. Изолинии наложены на карту г. Томска и показывают наиболее ответственные за содержание CO в приземном слое воздуха районы города в рассматриваемый период. Следует отметить, что, в целом, предсказанная численно картина соответствует расположению основных городских районов, ответственных за выброс в атмосферу CO и предложенная в работе методика позволяет также достаточно надежно оценить за короткий период времени и интенсивность таких выбросов.

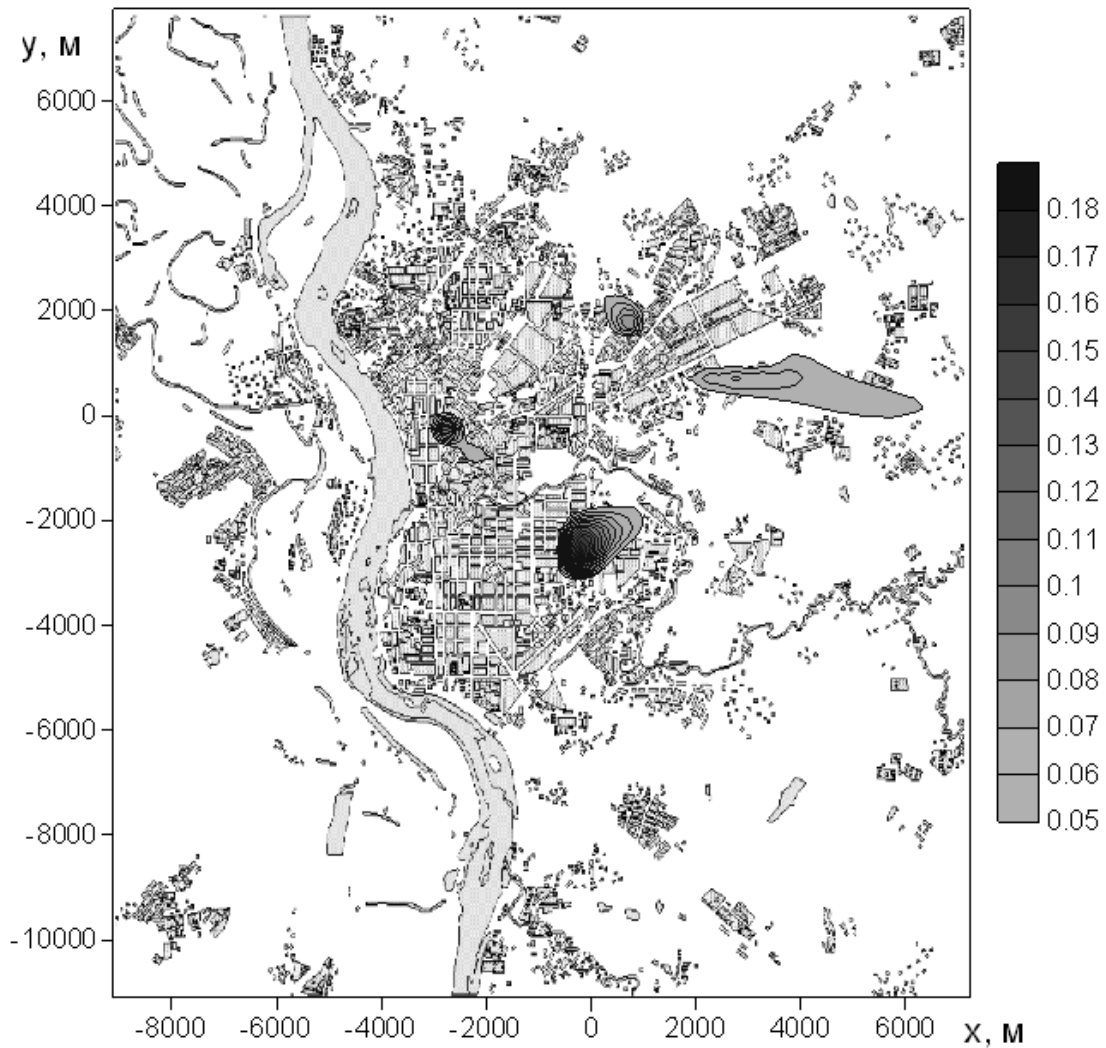


Рисунок 2 – Распределение наиболее значимых источников загрязнения воздуха CO на 7-8 сентября 2000 года

Также для рассматриваемого случая проводилось численное решение обратной задачи с использованием решения прямой в качестве необходимых входных данных. Сравнение результатов, полученных при решении обратной задачи с использованием измерений концентрации монооксида углерода и решения прямой задачи, показало, что они неплохо согласуются между собой по характеру найденного распределения районов города, активно выбрасывающих в атмосферу CO и по уровню их интенсивности.

Кроме представленных результатов численное решение обратной задачи переноса примеси для условий г. Томска проводилось с использованием данных мобильных измерений, которые были выполнены 11 июля 2005 года при помощи мобильной станции АКВ-2 ИОА СО РАН (рисунок 3).

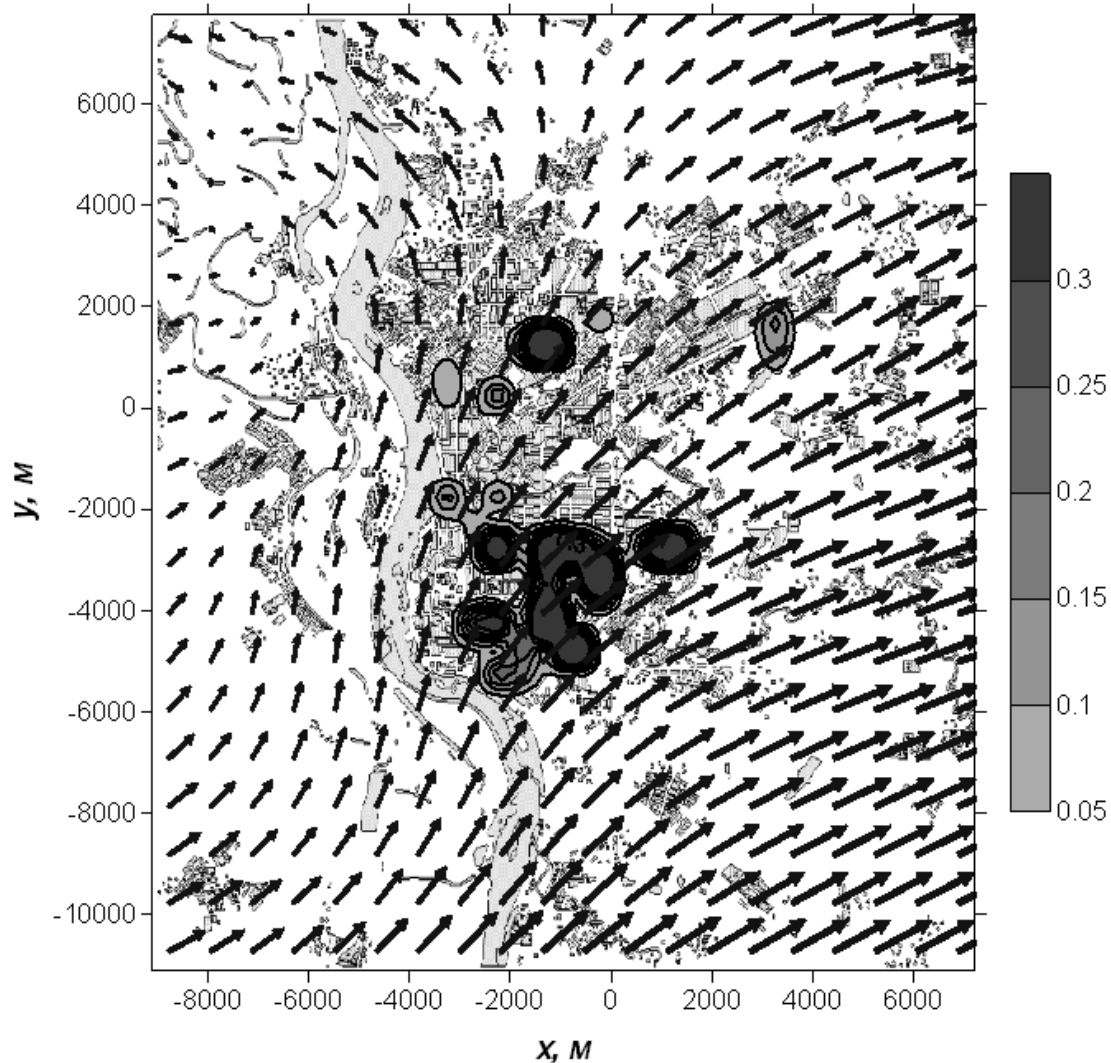


Рисунок 3 – Результаты решения обратной задачи переноса примеси при использовании 90 ($N=90$) измеренных значений концентрации

По результатам моделирования и измерений отчетливо видны наиболее заметные источники оксида углерода: центр города Томска, где наиболее развит транспортный узел и расположен ряд предприятий и северная часть Томска, где находится множество более мелких источников монооксида углерода.

В **заключении** диссертации приведены основные результаты.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Панасенко Е.А. Применение многопроцессорной вычислительной техники для численной реализации метода решения обратных задач переноса примеси с целью определения источников мгновенного выброса в чрезвычайных ситуациях / Е.А. Панасенко, А.В. Старченко // Вестник Новосибирского государственного университета. Сер. Информационные технологии. – 2009. – Т. 7, № 4. – С. 108–118.

2. Панасенко Е.А. Определение городских районов – загрязнителей атмосферного воздуха по данным наблюдений / Е.А. Панасенко, А.В. Старченко // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22, № 03. – С. 279–283.

3. Панасенко Е.А. Параллельная реализация численного метода решения об-

ратных задач переноса примеси с целью прогнозирования чрезвычайных ситуаций / Е.А. Панасенко, А.В. Старченко // Научный сервис в сети Интернет: решение больших задач : труды Всероссийской научной конференции. – М. : Изд-во МГУ, 2008. – С. 140–144.

4. Панасенко Е.А. Численное исследование переноса примеси в атмосфере // Фундаментальные проблемы новых технологий в третьем тысячелетии. Демидовские чтения : сборник материалов третьей всероссийской конференции молодых ученых в рамках Российского научного форума с международным участием / ИОА СО РАН. – Томск, 2006. – С. 582–586.

5. Панасенко Е.А. Численное решение некоторых обратных задач переноса примеси в атмосфере / Е.А. Панасенко, А.В. Старченко // Материалы XV Международной конференции по механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2007). – М. : Вузовская книга, 2007. – С. 404–405.

6. Панасенко Е.А. Численное решение некоторых обратных задач переноса примеси на многопроцессорных вычислительных системах / Е.А. Панасенко, А.В. Старченко // Четвертая Сибирская школа – семинар по параллельным вычислениям : сборник трудов ; под ред. А.В. Старченко. – Томск : Дельтаплан, 2008. – С. 139–148.

7. Панасенко Е.А. Численное решение некоторых обратных задач с различными типами источников атмосферного загрязнения / Е.А. Панасенко, А.В. Старченко // Вестник ТГУ. Механика и математика. – 2008. – № 2 (3). – С.47–56.

8. Панасенко Е.А. Математическое обеспечение компьютерных тренажеров для принятия решения в чрезвычайной ситуации, возникающей в результате аварийного выброса газодисперсного облака в атмосферу / А.В. Старченко [и др.] // Открытое и дистанционное образование. – 2008. – № 3 (31). – С. 42–46.

Тираж 100 экз.
Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а