

## ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОПРОЦЕССОРНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ИСТОЧНИКОВ МГНОВЕННОГО ВЫБРОСА В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ \*

Рассматриваются обратные задачи, в которых по данным измерений определяются мгновенные точечные источники загрязнения атмосферного воздуха. Излагается постановка задачи, обсуждаются алгоритмы решения задач и используемые разностные схемы численного решения уравнений. Кроме того, представлена модификация метода Г. И. Марчука для решения обратных задач, позволяющая с помощью многопроцессорных вычислительных систем определять источники загрязнения воздуха. Сформулированы параллельные алгоритмы для решения задач переноса примеси на многопроцессорной вычислительной технике с распределенной памятью. Алгоритмы опираются на принципы геометрической декомпозиции сеточной области и подход «master-slave» и в совокупности показывают высокую эффективность на кластерах семейства СКИФ.

*Ключевые слова:* задача переноса примеси, обратная задача, математическое моделирование, адвективно-диффузионное уравнение, пост наблюдения, разностная схема, параллельная реализация, суперкомпьютер СКИФ Cyberia.

### Введение

В современном мире проблема охраны окружающей среды становится одной из важных задач науки, развитие которой стимулируется постоянно растущими темпами технического прогресса. Ухудшение качества атмосферного воздуха происходит вследствие выбросов в атмосферу отходов промышленных предприятий, выхлопных газов автотранспорта и мгновенных выбросов, возникающих в чрезвычайных ситуациях [1].

Следует заметить, что источники вредных выбросов могут находиться не только в мегаполисах, но и в небольших городах, занятых наукоемким производством, таких как, например, г. Северск Томской области. Атомная станция представляет собой не столько прямую угрозу ввиду несовершенства оборудования, сколько угрозу возникновения чрезвычайной ситуации, связанной с человеческим фактором, т. е. ошибкой персонала, обслуживающего станцию. Именно поэтому необходима система, позволяющая оперативно оценить масштабы чрезвычайной ситуации, поскольку в данном случае последствия подобной ошибки могут быть катастрофическими [2].

В такой ситуации наличие постоянно работающей компьютерной системы мониторинга состояния окружающей среды позволило бы в кратчайшие сроки спрогнозировать расположение участков радиоактивного загрязнения и оперативно провести эвакуацию жителей из населенных пунктов, над которыми прошло облако с продуктами выброса. Поэтому сейчас одной из острейших проблем является разработка таких компьютерных прогнозирующих систем развития чрезвычайной ситуации и их использование в качестве компьютерных тренажеров для оценки чрезвычайной ситуации и принятия решения по данным мониторинга атмосферы.

Основой таких компьютерных прогнозирующих систем являются методы математического моделирования переноса в атмосферном пограничном слое [3]. В рамках этих моделей

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 07-05-01126).

описание распространения атмосферных примесей обычно представляется двумя классами задач. Первый – это решение «прямых» задач, когда по известным характеристикам источников примеси требуется найти поле концентрации примеси в различные моменты времени. Второй – решение «обратных» задач, когда по информации о концентрации примеси, измеренной в ряде контрольных точек, требуется найти тип, координаты и мощность ее источников.

Для решения этих задач широко используются численные методы, которые могут быть реализованы в компьютерных программах с привлечением высокопроизводительной вычислительной техники для оперативного получения результатов.

### Физическая постановка прямой задачи

Распространение примеси в приземном слое атмосферы над промышленным центром и его окрестностями исследуется при следующих условиях.

Рассматривается ограниченный в прямоугольнике участок территории  $L_x \times L_y \times L_z$ , на котором в момент времени  $t = t_0$  в точке с координатами  $(x_0, y_0, z_0)$  происходит выброс вредных газодисперсных примесей в атмосферу. При этом последующее распределение газообразных компонентов описывается уравнением турбулентной диффузии. Концентрация поступающей примеси и интенсивность ее осаждения в этих условиях рассчитывается в прямоугольной области при различной ориентации направления движения сносящего потока.

### Математическая постановка задачи

#### об адвективно-диффузионном переносе инертной газообразной примеси

С учетом принятой физической постановки задачи адвективно-диффузионное уравнение, моделирующее перенос газообразной примеси в заданном потоке, представляется в следующем виде [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} + W \frac{\partial C}{\partial z} + \sigma C = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \Gamma \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \Gamma \frac{\partial C}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right] + Q, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$C$  – концентрация примеси;

$U, V, W$  – компоненты соленидального вектора скорости атмосферного воздуха;

$\Gamma, K_z$  – коэффициенты турбулентной диффузии;

$Q$  – интенсивность поступления примеси от мгновенного точечного источника, где  $Q = Q_0 \delta(t - t_0) \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0)$ ,  $t_0, x_0, y_0, z_0$  – момент срабатывания и координаты источника,  $Q_0$  – мощность выброса;

$\sigma$  – интенсивность влажного осаждения (вымывания осадками) примеси.

Необходимые для моделирования переноса и рассеяния газообразного выброса параметры ( $U, V, W, \Gamma, K_z, \sigma$ ) берутся из анализа данных метеорологических наблюдений или результатов численного моделирования с использованием мезомасштабных теорий различного уровня замыкания [4; 5].

Начальные и граничные условия для уравнения (1) представляются в виде:

$$\begin{aligned} t = 0: C(0, x, y, z) = C_0(x, y, z); \\ x = 0: \frac{\partial C}{\partial x} = 0; \quad x = L_x: \frac{\partial C}{\partial x} = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y = 0: \frac{\partial C}{\partial y} = 0; \quad y = L_y: \frac{\partial C}{\partial y} = 0; \\
 z = 0: K_z \frac{\partial C}{\partial z} = \alpha C; \quad z = L_z: \frac{\partial C}{\partial z} = 0,
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где  $\alpha$  – скорость сухого осаждения примеси.

### **Физическая постановка обратной задачи идентификации параметров мгновенного источника по данным наблюдений**

Общая постановка обратной задачи переноса примеси может быть сформулирована следующим образом: требуется по известным метеорологическим параметрам атмосферы и результатам измерений концентрации примеси в  $N$  точках, проводимым в течение некоторого периода времени  $T$ , определить параметры (мощность, координаты и время срабатывания) источников примеси (рис. 1).

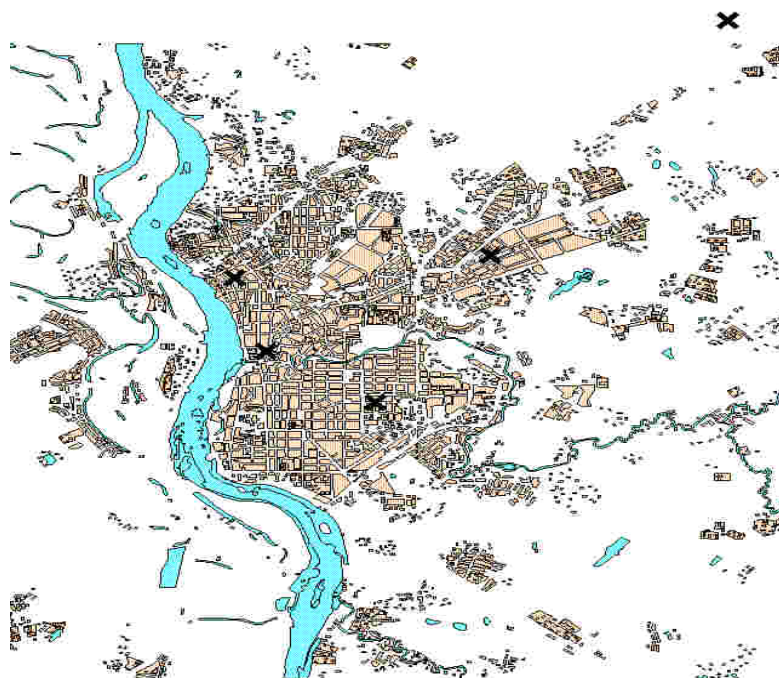


Рис. 1. Карта Томска с указанием расположения пунктов измерения концентрации примеси

### **Математическая постановка трехмерной сопряженной задачи переноса примеси**

Получим математическую постановку обратной задачи. Для этого будем использовать метод, который основан на решении уравнения, сопряженного с полуэмпирическим уравнением турбулентной диффузии, и двойственным представлением функционала от концентрации примеси [1]. Сопряженная постановка задачи получается с использованием задачи (1)–(2). Для этого уравнение (1) умножается на некоторую функцию  $C^*(t, x, y, z)$  и интегрируется по времени от 0 до  $T$  и по области исследования:

$$\int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C^* \frac{\partial C}{\partial t} dz dy dx dt + \int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C^* U \frac{\partial C}{\partial x} dz dy dx dt + \int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C^* V \frac{\partial C}{\partial y} dz dy dx dt +$$

$$+ \int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C^* W \frac{\partial C}{\partial z} dz dy dx dt + \int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C^* \sigma C dz dy dx dt = \int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C^* \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial C}{\partial x} \right) dz dy dx dt +$$

$$\int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C^* \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial C}{\partial y} \right) dz dy dx dt + \int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C^* \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) dz dy dx dt + \int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C^* Q dz dy dx dt.$$

Используя формулы интегрирования по частям, приходим к уравнению:

$$\int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C \left( -\frac{\partial C^*}{\partial t} - \frac{\partial(UC^*)}{\partial x} - \frac{\partial(VC^*)}{\partial y} - \frac{\partial(WC^*)}{\partial z} + \sigma C^* - \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial C^*}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial C^*}{\partial y} \right) - \right.$$

$$\left. - \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial C^*}{\partial z} \right) \right) dz dy dx dt = - \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C \cdot C^* \Big|_0^T dz dy dx - \int_0^T \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} U \cdot C^* \cdot C \Big|_0^{L_x} dz dy dt -$$

$$- \int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_z} V \cdot C^* \cdot C \Big|_0^{L_y} dz dx dt - \int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} W \cdot C^* \cdot C \Big|_0^{L_z} dy dx dt + \int_0^T \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} \Gamma C^* \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_0^{L_x} dz dy dt -$$

$$\int_0^T \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} \Gamma C \frac{\partial C^*}{\partial x} \Big|_0^{L_x} dz dy dt + \int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_z} \Gamma C^* \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_0^{L_y} dz dx dt - \int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_z} \Gamma C \frac{\partial C^*}{\partial y} \Big|_0^{L_y} dz dx dt +$$

$$\int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} K_z C^* \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_0^{L_z} dy dx dt - \int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} K_z C \frac{\partial C^*}{\partial z} \Big|_0^{L_z} dy dx dt + \int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C^* Q dz dy dx dt. \quad (3)$$

В силу произвольности выбора  $C^*$  предположим, что функции  $C_k^*$ ,  $k = 1, \dots, N$  удовлетворяют уравнениям

$$-\frac{\partial C_k^*}{\partial t} - \frac{\partial UC_k^*}{\partial x} - \frac{\partial VC_k^*}{\partial y} - \frac{\partial WC_k^*}{\partial z} + \sigma C_k^* - \frac{\partial}{\partial x} \Gamma \frac{\partial C_k^*}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} \Gamma \frac{\partial C_k^*}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial C_k^*}{\partial z} = P_k \quad (4)$$

со следующими начальными и граничными условиями (предполагается, что  $W = 0$  при  $z = 0$  и  $z = L_z$ ):

$$C_k^*(T, x, y, z) = 0;$$

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

$$y = 0 : VC_k^* + \Gamma \frac{\partial C_k^*}{\partial y} = 0; \quad y = L_y : VC_k^* + \Gamma \frac{\partial C_k^*}{\partial y} = 0; \quad (5)$$

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

где  $P_k = \delta(x - x_k) \delta(y - y_k) \delta(z - z_k) \delta(t - t_k)$ ,  $k = 1, \dots, N$ ;  $N$  – количество измерений концентрации  $C(t, x, y, z)$  в точках с координатами  $(x_k, y_k, z_k)$  в момент времени  $t_k$ . Здесь предполагаем, что  $t_k \gg 0$  настолько, что справедливым является допущение

$$C_k^*(0, x, y, z) = 0. \quad (6)$$

С учетом (4)–(6) из (3) получаем  $\int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C P_k dz dy dx dt = \int_0^T \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} C_k^* Q dz dy dx dt$ ;  $k = 1, \dots, N$ ,

где  $C_k^*$  – решение  $k$ -й сопряженной задачи (4)–(5) с правой частью  $P_k$ . Вследствие принятого вида функций  $P_k$  и  $Q$  последнее равенство переписывается как

$$Q_0 C_k^*(t_0, x_0, y_0, z_0) = C_k; \quad C_k = C(t_k, x_k, y_k, z_k); \quad k = 1, \dots, N \quad (7)$$

и может рассматриваться в качестве двойственного представления функционала от концентрации примеси. При этом нахождение решения системы уравнений (7) позволяет установить параметры источника загрязнения (координаты, момент срабатывания источника и интенсивность).

### Численное решение дифференциальных уравнений

В силу сложной зависимости метеорологических параметров атмосферного пограничного слоя от времени и координат задачи (1)–(2) и (4)–(5) могут быть решены только приближенно с использованием вычислительной техники. Их решение строится на основе метода конечного объема [6]. При построении разностного аналога дифференциальной задачи дифференциальные уравнения (1) и (4) интегрируются по конечному объему, для вычисления интегралов используются интерполяционные формулы. В данной работе для аппроксимации адвективных членов применялись противопотоковая схема первого порядка, схема MLU Ван Лири второго порядка и схема Бота четвертого порядка [7]. Используемые явные разностные схемы тестировались на известных аналитических решениях, и было получено, что наиболее точные результаты дают схема MLU и схема Ботта. Диффузионные слагаемые в уравнениях аппроксимируются со вторым порядком точности.

### Параллельная реализация численного решения обратной задачи

Распараллеливание метода численного решения обратной задачи по определению параметров точечного мгновенного источника производилось с использованием функциональной декомпозиции (принцип «master-slave») и геометрической (принцип «data decomposition»).

При организации параллельных вычислений с использованием принципа «master-slave» при запуске параллельной программы на  $N + 1$  вычислительных узлах большую долю вычислительной работы обычно выполняют  $N$  подчиненных slave-узлов. Один управляющий master-узел координирует работу остальных (подготавливает и рассылает slave-узлам данные для расчета, собирает результаты их расчетов и осуществляет их дополнительную обработку). На каждом узле в данный момент выполняется единственная сопряженная задача (процесс), в случае недоступности требуемого количества узлов задание ставится в очередь до момента освобождения нужного количества узлов [8].

В нашем случае управляющий процесс передает каждому процессу значения параметров постов наблюдения, скорость, размеры области, коэффициент диффузии  $(U, V, W, \Gamma, K_z, x_k, y_k, z_k, t_k)$ , необходимые для расчетов (рис. 2). Каждый из процессов рассчитывает решение сопряженной задачи, расчеты ведутся независимо друг от друга. Найденные на каждом шаге по времени решения сопряженных задач (4)–(5) возвращаются управляющему процессу, который ищет глобальный минимум функционала

$$\phi(Q, t, x, y, z) = \sum_{k=1}^N \left( Q_0 C_k^*(t_{00}, x_{00}, y_{00}, z_{00}) - C_k \right)^2 \text{ в } (0, T) \times [0, L_x] \times [0, L_y] \times [0, L_z].$$

Также в данной работе был рассмотрен способ организации параллельных вычислений, при котором управляющий процесс дополнительно численно интегрировал одну сопряженную задачу. В этом случае число подчиненных процессов сокращается на единицу.

На рис. 3 представлены характеристики ускорений рассмотренных выше параллельных алгоритмов численного решения обратной задачи, полученных при запуске параллельных программ на вычислительном кластере ТГУ СКИФ Cyberia.

Ускорение рассчитывается как отношение времени выполнения программы, решающей задачу на одном процессоре, к времени численного решения задачи на  $p$  процессорах. Из рис. 3 видно, что при выполнении параллельной программы на 5 процессорах вычислительного кластера СКИФ Cyberia при указанных выше параметрах и при условии, что мастер только подсчитывает суммы для  $\phi(Q, t, x, y, z)$  и ищет его минимум, удастся получить ускорение вычислений почти в 4 раза (на рис. 3 – это кривая с закрытыми значками). В случае же, когда работают все процессы и master и slave, но мастер, рассчитывая значения функционала

и осуществляя поиск его минимума, еще решает одну сопряженную задачу, как и подчиненные процессы, получено ускорение в 3,5 раза (кривая с открытыми значками). Разница в ускорении связана с тем, что в последнем случае дополнительно на каждом шаге по времени происходит пересылка решений сопряженной задачи от вычислительных узлов управляющему процессу, что занимает больше времени, чем при решении прямой задачи.

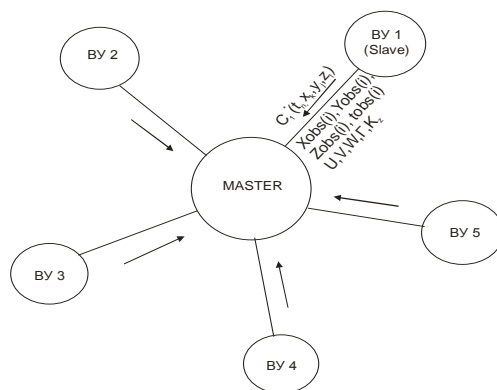


Рис. 2. Схема параллельной реализации

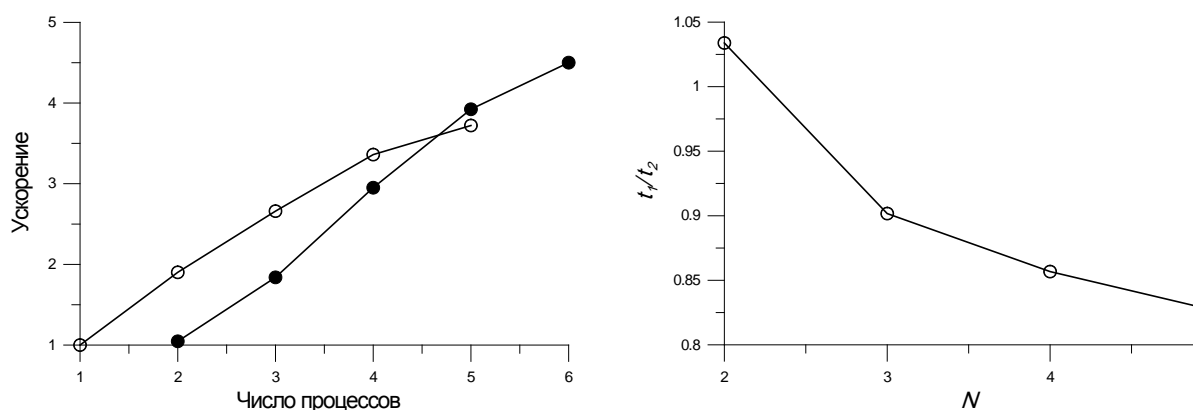


Рис. 3. Ускорение для двух способов параллельной реализации и отношение времен работы параллельных программ

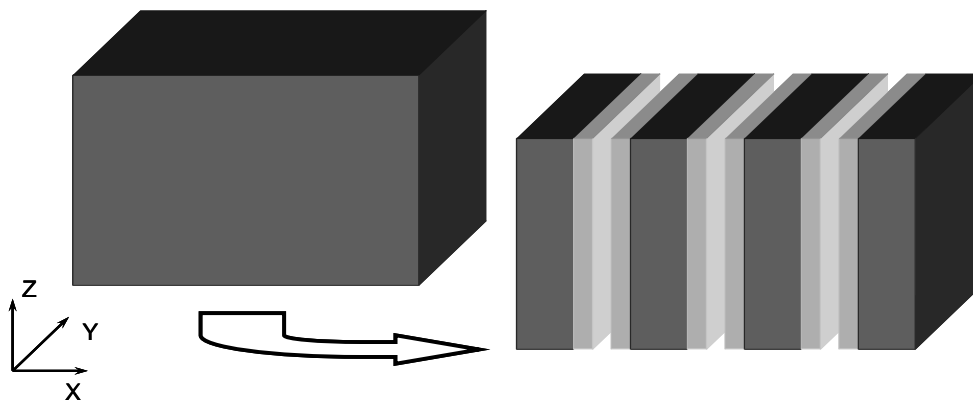
На рис. 3 также представлено изменение отношения времен работы параллельных программ в зависимости от количества сопряженных задач. Из рисунка также следует, что первый способ организации параллельных вычислений имеет решительное преимущество с ростом  $N$ .

Выше был описан принцип «master-slave», но при моделировании атмосферных процессов возможно использование еще одного способа параллельной реализации – геометрической декомпозиции.

Следует отметить, что декомпозиция расчетной области при моделировании пространственных процессов в атмосфере может быть проведена 3 способами: декомпозиция по трем направлениям (вертикальному и двум горизонтальным), двумерная декомпозиция (по двум направлениям) и одномерная. Распределение данных по вертикальной координате представляется нежелательным из-за большого количества интегрирований по вертикальным столбцам, которое свойственно моделям атмосферного пограничного слоя и моделям переноса примеси. Поэтому если данные в вертикальном столбце вычисляются несколькими процессами, то вычисление интегральных характеристик этого столбца будет сопряжено с множе-

ством пересылок данных между процессами, что снижает ускорение алгоритма и чего можно избежать при использовании более распространенных способов декомпозиции вдоль одной или обеих горизонтальных координат [9]. Кроме того, при небольшом числе используемых процессоров эффективность параллельных программ, построенных с применением различных способов декомпозиции области исследования, примерно одинакова, поэтому в данной работе выбрана более простая одномерная декомпозиция по горизонтальной координате  $X$ . При таком способе параллельной реализации область исследования разделяется на подобласти, число которых равно числу процессов, ведущих расчеты независимо друг от друга. В этом случае объемы вычислительной нагрузки на процессы напрямую определяется равномерностью декомпозиции расчетной области и если не одинаковы, то, по крайней мере, очень близки между собой.

Схема декомпозиции представлена на рис. 4. Отметим, что декомпозиция вдоль обеих горизонтальных координат предпочтительнее при наличии вычислительных систем с большим числом процессоров.



На рис. 5 представлены характеристики ускорения, полученные при использовании параллельного алгоритма «data decomposition». Двенадцатикратное ускорение на 20 процессорах (случай прямой задачи) и восьмикратное в случае обратной задачи говорит о хорошей степени параллелизма алгоритма и удачном планировании обменов между процессами. Заметим, что достаточно высокое ускорение обусловлено значительными размерами расчетных подобластей и трудоемкостью вычислений в каждой из них. Поэтому доля обменов между процессами составляет незначительную часть от общего времени выполнения программы. Также следует отметить, что разница в ускорении связана с тем, что в последнем случае дополнительно на каждом шаге по времени происходит пересылка решений сопряженной задачи от вычислительных узлов управляющему процессу, что занимает больше времени, чем при решении прямой задачи.

### Результаты расчетов

При решении обратной задачи с целью определения характера распределения и интенсивности точечного мгновенного источника загрязнения атмосферного воздуха для проверки правильности работы программы использовались результаты решения прямой задачи в качестве необходимых входных данных.

В качестве входных параметров для решения задач использовались следующие. Рассматривается область размером  $50 \times 50$  км, в центральной части которой располагаются посты наблюдения. Метеорологические условия соответствуют летнему сезону, безоблачной погоде со слабым юго-восточным ветром силой 1–3 м/с. В момент времени 12,3 часа в точке с координатами  $x_{00} = -250$  м,  $y_{00} = -250$  м,  $z_{00} = 50$  м (начало координат размещается на уровне моря в центре рассматриваемой области) происходит выброс 1 000 кг газообразного вещества, плотность которого совпадает с плотностью воздуха. Параметры постов наблюдения ( $N = 6$ ) представлены в табл. 1.

В результате численной реализации прямой задачи переноса примеси было получено изменение концентрации примеси с течением времени после выброса по области исследования. Метеорологические параметры (скорость, направление приземного ветра, турбулентные характеристики атмосферного пограничного слоя) рассчитывались с использованием мезомасштабной модели ТГУ-ИОА СО РАН [10]. На рис. 6, а представлены изолинии интенсивности выброса примеси, полученные при решении прямой задачи, расположение постов наблюдения, по данным и измерению которых решалась обратная задача.

Таблица 1

Параметры постов наблюдения (случай 1)

№ поста	Координата (м)			Время измерения (ч), $t$	Измеренная концентрация примеси ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), $C$
	$x$	$y$	$z$		
1	-4 750	6 250	1	13,200	0,221000
2	-3 750	3 250	1	12,833	0,465900
3	-2 750	8 250	1	13,033	0,001443
4	-4 250	9 250	1	13,100	0,005116
5	-2 250	5 250	1	12,983	0,076340
6	-750	4 250	1	12,767	0,001264



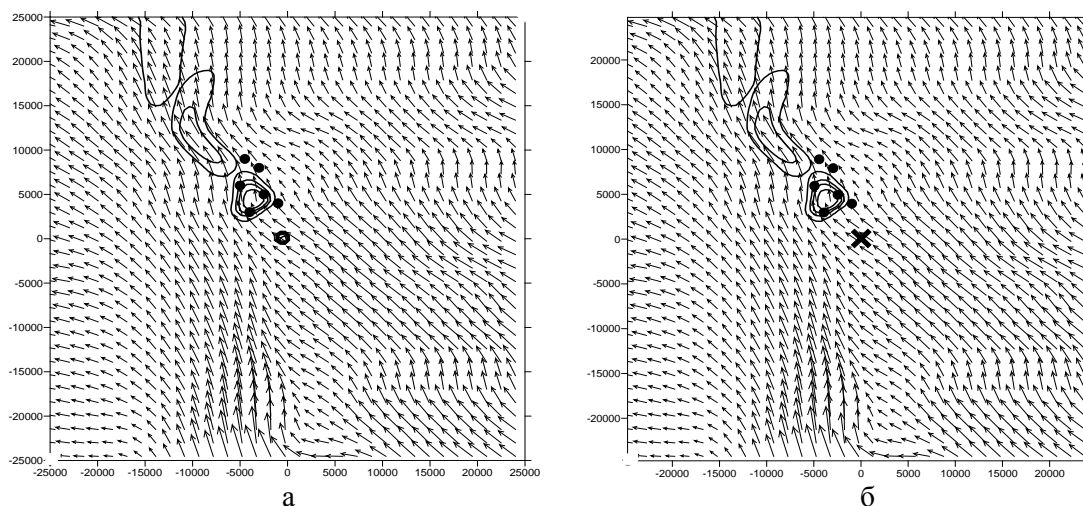


Рис. 6. Распределение концентрации примеси после выброса по области исследования с течением времени: *а* – решение прямой задачи, закрытые кружки соответствуют постам наблюдения; *б* – крестиком отмечено найденное из решения обратной задачи положение источника выброса

По результатам численного решения прямой задачи (см. табл. 1) проводилось тестирование правильности решения обратной задачи (определения координат, времени выброса и интенсивности источника). При этом результаты расчетов по прямой задаче брались в качестве необходимых входных данных для обратной, при решении которой были получены следующие результаты:  $t_0 = 12,4$  ч, координаты:  $x_0 = -750$  м,  $y_0 = 250$  м,  $z_0 = 105$  м,  $Q_0 = 782,6$  кг (рис. 6, б). В представленных результатах бралось выгодное положение постов наблюдения по направлению распространения примеси, соответственно результаты получились достаточно точными. Но рассматривались и другие варианты расположения постов наблюдения (табл. 2).

Таблица 2

Параметры постов наблюдения (случай 2)

№ поста	Координата (м)			Время измерения (ч), $t$	Измеренная концентрация примеси (кг/м <sup>3</sup> ), $C$
	$x$	$y$	$z$		
1	-3 750	-250	1	12,700	0,0001858
2	-3 750	1 750	1	12,700	0,5160000
3	-2 750	3 250	1	12,767	0,5579000
4	-750	3 250	1	12,667	0,0021920
5	1 250	2 750	1	12,617	$0,3270 \cdot 10^{-8}$
6	1 750	1 250	1	12,500	$0,1661 \cdot 10^{-8}$

В результате численного решения прямой задачи были получены результаты, которые представлены на рис. 7, *а*, т. е. распределение концентрации примеси по области исследования с течением времени и расположение постов наблюдения.

При расположении постов, приведенных в табл. 2, в результате решения обратной задачи с целью определения параметров источника выброса, были получены следующие результаты:  $t_0 = 12,1$  ч, координаты:  $x_0 = 1 250$  м,  $y_0 = -1 750$  м,  $z_0 = 30$  м,  $Q_0 = 1 378$  кг (рис. 7, б).

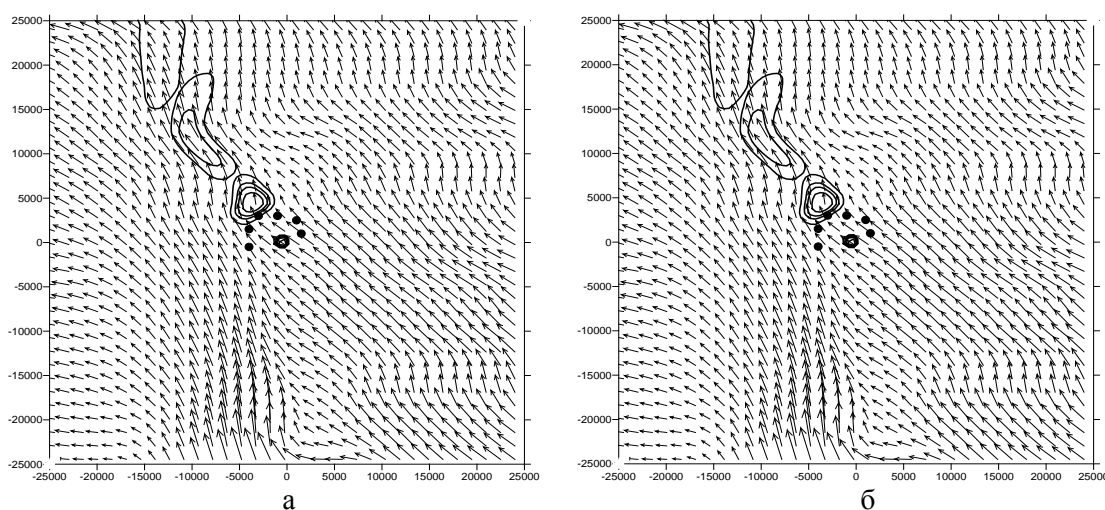


Рис. 7. Распределение концентрации после выброса по области исследования:  
*а* – решение прямой задачи, закрытые кружки соответствуют постам наблюдения; *б* – крестиком отмечено найденное из решения обратной задачи положение источника выброса

Анализируя полученные результаты, следует отметить, что во втором случае расположения постов получились менее точные результаты, чем в первом случае. Это связано с тем, что 2 поста из 6 во втором случае расположены не на пути распространения примеси и соответственно измерения на этих постах менее точные. Но в целом, сравнивая найденные значения параметров источника выброса, которые были получены при решении обратной задачи, и входные параметры прямой задачи, следует отметить, что результаты неплохо согласуются между собой не только по координатам местоположения источника, но и по интенсивности выброса. Предсказанное численно месторасположение и мощность выброса соответствует данным, которые использовались в качестве входных параметров в прямой задаче.

Описанные выше подходы использовались при создании в ТГУ аппаратно-программного комплекса на базе кластера СКИФ Cyberia и Телепорта ТГУ. Данный расчетно-программный комплекс разрабатывался с целью численного моделирования переноса примеси в атмосферном пограничном слое над ограниченной поверхностью. Комплекс построен по клиент-серверной архитектуре с передачей подготовленных исходных данных на кластер СКИФ Cyberia с последующим решением прямых и обратных задач переноса примеси и возвращением графического материала пользователю для анализа и принятия решения. Дано описание выбранных урбанизированных территорий и метеорологических ситуаций, соответствующих условиям средней полосы России. Подробно рассмотрена технология запуска разработанных параллельных приложений на вычислительном кластере, на основе вычислительных экспериментов обоснован выбор количества процессоров для запуска параллельных программ. На основе большого количества цветных иллюстраций продемонстрирован порядок работы с созданным расчетно-программным комплексом с удаленного компьютера и организация передачи данных расчета с кластера. Кроме того, разработан веб-интерфейс доступа к расчетно-программному комплексу с удаленного компьютера<sup>1</sup>.

При разработке данного комплекса использовались описанные в данной работе математические модели, в том числе математические постановки для решения задачи моделирования переноса газодисперсного выброса в атмосфере, а также обратной задачи по определению координат и интенсивности мгновенного источника выброса по данным наземных измерений. Также использовались описанные выше вычислительные алгоритмы численного решения адвективно-диффузионных уравнений и принципы параллельной реализации.

<sup>1</sup> См.: [www.mchs.tsu.ru](http://www.mchs.tsu.ru)

## Заключение

В представленной работе сформулирована постановка обратной задачи идентификации параметров выброса по данным наблюдений через аппарат сопряженных уравнений и двойственное представление функционала от концентраций примеси. Разработаны параллельные методы численного решения обратных задач. При параллельной реализации задачи о распространении газообразного выброса использовались принципы «master-slave» и «data decomposition», которые отличаются простотой реализации и высокой эффективностью, что продемонстрировали тестовые расчеты, проведенные на кластере ТГУ СКИФ Cyberia. На основе проведенных вычислительных экспериментов установлено, что параллельная реализация алгоритма в случае тестовой задачи ускоряет процесс вычислений в несколько раз. Разработанные параллельные алгоритмы и программы используются в компьютерных тренажерах. Так, созданный в ТГУ аппаратно-программный комплекс на базе кластера СКИФ Cyberia и Телепорта ТГУ позволяет эффективно проводить научные исследования с использованием средств и технологий удаленного доступа, осуществлять образовательные программы с применением дистанционных образовательных технологий. Практическое использование данного комплекса возможно для изучения загрязнения атмосферы в результате техногенных и природных катастроф, прогнозирования чрезвычайных ситуаций с целью определения их масштаба и предотвращения последствий.

## Список литературы

1. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 315 с.
2. Израэль Ю. А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий. СПб.: ПРОГРЕСС-ПОГОДА, 1996. 356 с.
3. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Под ред. Ф. Т. М. Ньистадта, Х. Ван Допа. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 352 с.
4. Старченко А. В., Беликов Д. А. Численная модель для оперативного контроля уровня загрязнения городского воздуха // Оптика атмосферы и океана. 2003. № 7. С. 657–665.
5. Старченко А. В., Беликов Д. А., Вражнов Д. А., Есаулов А. О. Применение мезомасштабных моделей MM5 и WRF к исследованию атмосферных процессов // Оптика атмосферы и океана. 2005. № 05–06. С. 455–461.
6. Старченко А. В. Моделирование переноса примеси в однородном пограничном слое // Тр. Междунар. конф. ENVIRONMENTIS2000. Томск: ЦНТИ, 2001. С. 77–84.
7. Панасенко Е. А. Численное исследование переноса примеси в атмосфере // Фундаментальные проблемы новых технологий в III тысячелетии. Демидовские чтения: Сб. материалов III Всерос. конф. молодых ученых в рамках Российского научного форума с международным участием. Томск, 2006. С. 582–586.
8. Панасенко Е. А., Старченко А. В. Численное решение некоторых обратных задач переноса примеси на многопроцессорных вычислительных системах // Четвертая сибирская школа-семинар по параллельным и высокопроизводительным вычислениям: Сб. тр. Томск: Дельтаплан, 2008. С. 139–148.
9. Старченко А. В. Параллельные вычисления в задачах охраны окружающей среды // Вторая сибирская школа-семинар по параллельным вычислениям: Сб. тр. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2004. С. 17–22.
10. Старченко А. В. Численное исследование локальных атмосферных процессов // Вычислительные технологии. 2005. Т. 10, ч. 2. С. 81–89.

**E. A. Panasenko, A. V. Starchenko**

**APPLICATION OF MULTIPROCESSING COMPUTER FACILITIES  
IN DEFINITION OF SOURCES OF INSTANT EMISSION IN EXTREME SITUATIONS**

The inverse problems are considered in the present work and instant the sources of atmosphere pollution are defined by measurements. The statement of the problem is formulated and algorithms of the problems solution, used numerical schemes for equations are discussed. Besides the modification of G. I. Marchuk method for the solution of the inverse problems is realized which is allow with the use of multiprocessing computing systems to define sources of air pollution. Parallel algorithms for the solution of problems of carry of an impurity on multiprocessing computer facilities with the distributed memory are formulated. Algorithms base on principles of geometrical decomposition and the approach «master-slave» and they in aggregate show high efficiency on computing cluster Cyberia.

*Keywords:* a problem of carry of an impurity, a inverse problem, mathematical modelling, the equation of advection and diffusion, a post of supervision, a numerical schemes, parallel realization, a cluster Cyberia.