

В.В. Пененко, Э.А. Пьянова, А.В. Чернова

Изучение процессов мезомасштабного переноса примесей с помощью моделей эйлера и лагранжева типов

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

Поступила в редакцию 6.02.2007 г.

Представлен комплекс моделей мезомасштабного переноса примесей, включающий детерминированную модель в эйлеровой постановке и детерминированно-стохастическую в рамках лагранжева подхода. Приведены результаты сравнительных экспериментов по моделированию переноса примеси в областях со сложной геометрией.

Введение

Исследования по разработке математических моделей и методов для описания процессов переноса, диффузии и турбулентного обмена примесей в газовом и аэрозольном состоянии активно ведутся с начала XX в. К настоящему времени уже накоплен значительный опыт применения детерминированных и стохастических способов моделирования для целей диагностики и прогнозирования изменений качества атмосферы, обусловленных воздействиями естественного и антропогенного характера. Достаточно представительные обзоры основных подходов к решению данного класса задач даны в работах [1–3] и в цитированных там публикациях. Условно эти подходы, в соответствии с используемыми моделями, можно разделить на две категории: 1) модели эйлера типа, в которых уравнения адвективно-диффузионного типа интегрируются на пространственно-временных сетках заданной структуры; 2) модели лагранжева типа, в которых адвективные и диффузионные составляющие движения частиц примесей рассчитываются различными способами на некоторых бессеточных структурах, перестраиваемых эволюционно в пространстве и времени в зависимости от поведения несущей среды.

Заметим, что эти подходы не являются альтернативными. Они отличаются системной организацией алгоритмов и, по существу, дополняют друг друга. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки и свои области применимости. Поэтому интерес представляют гибридные системы, объединяющие лучшие достоинства обоих подходов. Система такого типа создается и в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Она базируется на вариационных принципах с использованием прямых и сопряженных задач и методов теории чувствительности для детерминированных и детерминированно-стохастических моделей переноса и трансформации примесей [4–6]. В настоящей статье представлена одна

из модификаций для решения 4D мезомасштабных задач переноса примесей в режиме прямого моделирования. Основные ее элементы: детерминированная модель в эйлеровой постановке и детерминированно-стохастическая модель лагранжева типа. Для расчета характеристик гидродинамического фона атмосферы как несущей среды используется негидростатическая мезомасштабная модель динамики атмосферы в областях со сложным рельефом подстилающей поверхности [7, 8].

Исследование применимости и сравнение двух моделей основывались на решении задачи о выбросе пассивной примеси.

1. Постановка задачи

Итак, в настоящей статье рассматривается модель переноса пассивной примеси, которую можно описать следующим уравнением [7]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + (w - w_c) \frac{\partial c}{\partial z} = \Delta_c c + f(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями

$$\begin{aligned} c(\mathbf{x}, 0) &= c^0(\mathbf{x}), \quad t = 0, \\ \frac{\partial c}{\partial x} &= 0, \quad x = 0, X, \quad \frac{\partial c}{\partial y} = 0, \quad y = 0, Y, \quad \frac{\partial c}{\partial z} = 0, \quad z = H, \quad (2) \\ v_c \frac{\partial c}{\partial z} &= (\beta_c - w_c)c - f_0(x, y, t), \quad z = \delta(x, y), \end{aligned}$$

где $c(\mathbf{x}, t)$ — концентрация примеси; t — время; $\mathbf{x} = (x, y, z)$ — декартовы координаты, $\mathbf{u} = (u, v, w)$ — вектор скорости воздушных масс; w_c — скорость оседания примеси; v_c — коэффициент турбулентности; β_c — величина, характеризующая взаимодействие примеси с подстилающей поверхностью; f, f_0 — функции источников; $\delta(x, y)$ — функция, описывающая рельеф местности; $c^0(\mathbf{x})$ — поле концентрации примеси в начальный момент времени.

Входными параметрами задачи (1), (2) являются метеоэлементы (вектор скорости ветра, коэффициенты турбулентности и др.), которые рассчитываются с помощью мезомасштабной негидростатической модели динамики атмосферы [7, 8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div} \rho u u &= -\frac{\partial p'}{\partial x} + l \rho v + \Delta_u u, \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div} \rho v u &= -\frac{\partial p'}{\partial y} - l \rho u + \Delta_v v, \\ \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \operatorname{div} \rho w u &= -\frac{\partial p'}{\partial z} + \lambda \rho \vartheta' + \Delta_w w, \\ \frac{\partial \rho \vartheta'}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vartheta' u &= -S \rho w + \Delta_\vartheta \vartheta', \quad \operatorname{div} \rho u = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь ϑ' , p' – отклонения потенциальной температуры и атмосферного давления от их фоновых значений; $\rho = \rho(z)$ – заданная функция плотности воздуха; l – параметр Кориолиса; S , λ – параметры стратификации и плавучести. Оператор Δ_α ($\alpha = u, v, w, \vartheta, c$) имеет вид

$$\Delta_\alpha = \frac{\partial}{\partial x} \mu_{\alpha x} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_{\alpha y} \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu_{\alpha z} \frac{\partial}{\partial z},$$

где $\mu_{\alpha x}$, $\mu_{\alpha y}$, $\mu_{\alpha z}$ – коэффициенты турбулентной диффузии в направлении координат x , y , z соответственно.

Граничные условия для задачи (3) формулируются следующим образом. На боковых границах области ставятся однородные условия Неймана. На верхней границе предполагается затухание возмущений метеоэлементов. Влияние орографических и термических неоднородностей подстилающей поверхности учитывается в уравнении баланса тепла на поверхности и в краевых условиях на нижнем расчетном уровне модели, который совпадает с верхней границей приземного слоя. Применение теории приземного слоя приводит к условиям третьего рода. Таким образом, уравнения гидротермодинамики атмосферы и уравнение модели переноса (1), (2) интегрируются в области $D_t = D[0, T]$, где $D = \{0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y, \delta(x, y) + h \leq z \leq H\}$, а $0 \leq t \leq T$ – интервал времени; h – высота приземного слоя. При учете рельефа использованы идеи метода фиктивных областей. Метод реализации модели (3) подробно описан в [7, 8]. С полученными полями скорости ветра решается задача переноса пассивной примеси (1), (2).

2. Модели переноса примесей в атмосфере

Для решения поставленной задачи (1), (2) применялись две трехмерные модели: детерминированная модель в эйлеровой постановке [7, 8] и детерминированно-стохастическая в рамках лагранжева подхода [4–6]. Бессеточная структура лагранжевой модели привязывается к сеточной структуре в эйлеровых моделях, используемых для фор-

мирования гидротермодинамических процессов в несущей среде.

2.1. Схема реализации эйлеровой модели переноса примесей

Поскольку концентрация примесей, по физическому смыслу, не может быть отрицательной, большое значение в реализации численных моделей, основанных на уравнении переноса с турбулентной диффузией, играют конечно-разностные схемы, обладающие свойством монотонности. В данной статье построение численного алгоритма для четырехмерной модели переноса примеси (1), (2) осуществляется с помощью аппроксимации интегрального тождества вариационной формулировки модели, где в качестве весовых функций используются аналитические решения локальных сопряженных задач в пределах трехточечных шаблонов по каждому из координатных направлений [9]. Вариационный принцип использовался в сочетании с методом расщепления: исходная многомерная задача на каждом шаге по времени аппроксимировалась совокупностью последовательно решаемых одномерных задач.

Для построения дискретных аппроксимаций введем в D_t сеточную область D_t^h как прямое произведение одномерных сеток в направлениях t , x , y , z . При аппроксимации функций u , v , w , μ_{cx} , μ_{cy} , v_c предполагается, что в ячейках $\Delta D_{imk} = \{x_i \leq x \leq x_{i+1}, y_m \leq y \leq y_{m+1}, z_k \leq z \leq z_{k+1}\} \in D_t^h$ они кусочно-постоянны.

Запишем задачу (1), (2) в операторном виде и поставим в соответствие ей дискретный аналог интегрального тождества

$$\begin{aligned} I^h(c, c^*) &= \\ &= \sum_{j=0}^J \left\{ \int_{t_j}^{t_{j+1}} \left(\frac{\partial c}{\partial t}, c^* \right)^h dt + \int_{t_j}^{t_{j+1}} (Lc, c^*)^h dt - \int_{t_j}^{t_{j+1}} (f, c^*)^h dt \right\} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$Lc = u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + \tilde{w} \frac{\partial c}{\partial z} - \left(\frac{\partial}{\partial x} \mu_{cx} \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_{cy} \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} v_c \frac{\partial c}{\partial z} \right);$$

$\tilde{w} = w - w_c$; c^* – произвольная достаточно гладкая функция; индексом h отмечены аналоги соответствующих выражений.

Проведем преобразование выражения (4) с помощью операций интегрирования по частям, выбирая функции c^* в виде произведения решений одномерных сопряженных задач, определенных на совокупности ячеек сеточной области D_t^h , как в [9]:

$$c_{imk}^*(\mathbf{x}) = c_{imk}^* c_{x_i}^*(x) c_{y_m}^*(y) c_{z_k}^*(z).$$

Каждую из $c_s^*(s)$, ($s = x, y, z$) выберем из совокупности фундаментальных решений одномерных

уравнений в пределах ячеек сеточной области в направлении координатных линий:

$$L_s^* c_s^*(s) \equiv \frac{\partial}{\partial s} \rho \mu_{cs} \frac{\partial c_s^*(s)}{\partial s} + \rho u_s \frac{\partial c_s^*(s)}{\partial s} = 0, \quad (5)$$

$$u_s = u, v, \tilde{w}, \quad \mu_{cs} = \mu_{cx}, \mu_{cy}, \nu_c,$$

$$c_s^*(s_\alpha) = 1, \quad c_s^*(s_{\alpha+1}) = 0; \quad c_s^*(s_\alpha) = 0, \quad c_s^*(s_{\alpha+1}) = 1,$$

$$s \in [s_\alpha, s_{\alpha+1}], \quad \alpha = i, j, k.$$

С использованием полученных функций c^* выполним все операции интегрирования в (4), проведем дискретизацию по времени. Окончательно, вычислив производные $\partial I^{tr}(c_{imk}^i, c_{imk}^j) / \partial c_{imk}^j = 0$ для всех j, i, m, k , определяющих нумерацию узлов D_t^h , придем к схеме расщепления, записанной в виде систем разностных уравнений для каждого координатного направления. Последние на каждом дробном шаге по времени решаются методом прогонки.

Построенные таким образом численные схемы для решения уравнения переноса примеси обладают свойствами устойчивости, монотонности и транспортности. Они обеспечивают неотрицательность концентраций, выполнение соотношений баланса массы и перенос примеси по направлению потока несущей среды.

2.2. Алгоритм моделирования переноса примесей в лагранжевой постановке

Вторая версия численной модели для решения задачи (1), (2) основана на методе расщепления и осуществляется в рамках лагранжева подхода. Опишем схему алгоритма, следуя [4]. По существу, схема реализации лагранжевой модели переноса (ЛМП) примесей имеет бессеточную структуру в пространстве и времени. Параметры гидродинамического фона предполагаются заданными на регулярной сеточной области $D_t^h \subset D_t$. В модели (1), (2) это функции \mathbf{u} , μ и другие, рассчитываемые с использованием функции состояния модели (3). Поэтому бессеточная структура ЛМП привязывается к сетке D_t^h эйлеровой модели динамики атмосферы. То есть частицы движутся сквозь сетку D_t^h , координаты и все характеристики любой текущей точки траектории движения частиц идентифицируются в соответствующем 4-мерном параллелепипеде сеточной области D_t^h , которые запишем в виде $\Delta D_c \equiv D_{imk}^j$.

Все необходимые для ЛМП элементы гидродинамического фона в текущей точке траектории рассчитываются с помощью процедур интерполяции по значениям соответствующих полей в вершинах сопровождающего эту точку параллелепипеда. Обозначим параметры сетки D_t^h по времени и пространственным переменным в численной модели (3)

через $\{\Delta\tau, \Delta s_E, s = x, y, z\}_{imk}^j$, а шаг по времени в ЛМП через Δt . Для построения численной схемы моделирования траекторий индивидуальных частиц и их ансамблей исходная задача расщепляется на три физических процесса: расчет эмиссии примесей из источников, перенос по траекториям воздушной массы, турбулентный обмен.

Адвективный перенос. На первом этапе рассчитывается концентрация примесей в локальных зонах, прилегающих к точкам расположения источников. На этапе переноса по заданному полю скоростей рассчитываются детерминированные элементы траекторий частиц примеси. Выпишем уравнение переноса по траекториям движения воздушных масс:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \frac{\partial \phi}{\partial x} + v \frac{\partial \phi}{\partial y} + \tilde{w} \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad t_j \leq t \leq t_{j+1}. \quad (6)$$

От этого уравнения можно перейти к системе трех уравнений [10]:

$$\frac{dx}{dt} = u(\mathbf{x}, t), \quad \frac{dy}{dt} = v(\mathbf{x}, t), \quad \frac{dz}{dt} = \tilde{w}(\mathbf{x}, t), \quad (7)$$

которая позволяет рассчитывать местоположение частицы на каждом шаге по времени t_{j+1} при заданных значениях координат $\mathbf{x}^j = (x, y, z)^j$ в момент времени t_j .

Для построения численной схемы используется аппроксимация второго порядка точности:

$$\Delta x^{j+1} = u(\mathbf{x}^j, t^j) \Delta t + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \Delta x^{j+1} + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y^{j+1} + \frac{\partial u}{\partial z} \Delta z^{j+1} \right) \Delta t,$$

$$\Delta y^{j+1} = v(\mathbf{x}^j, t^j) \Delta t + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \Delta x^{j+1} + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y^{j+1} + \frac{\partial v}{\partial z} \Delta z^{j+1} \right) \Delta t,$$

$$\Delta z^{j+1} = \tilde{w}(\mathbf{x}^j, t^j) \Delta t + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{w}}{\partial x} \Delta x^{j+1} + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial y} \Delta y^{j+1} + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} \Delta z^{j+1} \right) \Delta t. \quad (8)$$

Параметры этой схемы выбираются адаптивно к интенсивности процесса, исходя из условий аппроксимации и устойчивости:

$$\left(\frac{2\mu_s}{\Delta s_E^2} + \frac{|u_s|}{\Delta s_E} \right) \Delta \tau_s \leq 1, \quad \Delta t \leq \min_{\langle s \rangle} \{\Delta \tau_s\}, \quad s = x, y, z, \quad (9)$$

где Δs_E – параметры сетки D_t^h в рамках сопровождающего траектории частиц параллелепипеда ΔD_c ; $\Delta \tau_s$ – шаг по времени, при котором выполняются условия аппроксимации Куранта, Фридрикса, Леви [11] по переменной s в рамках подобласти ΔD_c ; $u_s \equiv \{u, v, \tilde{w}\}$ – значения компонент вектора скорости; μ_s – значения коэффициентов турбулентности в точке траектории (\mathbf{x}^j, t^j) , рассчитанные с помощью значений метеополей в вершинах ΔD_c . Производные в (8) также рассчитываются по разностным соотношениям в пределах этого же параллелепипеда.

В результате решения системы уравнений (8) относительно $\Delta \mathbf{x} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ получаем координаты частицы $\mathbf{x}^{j+1/2}$ на первом этапе расщепления (6), (7):

$$\mathbf{x}^{j+1/2} = \mathbf{x}^j + \Delta \mathbf{x}^{j+1}. \quad (10)$$

Турбулентный обмен. Турбулентное движение частиц на каждом шаге по времени рассматривается как стохастический процесс. Для построения вычислительного алгоритма этого процесса используется метод локальных аппроксимаций [12, 13]. Такой подход позволяет сложный процесс с неоднородной анизотропной турбулентностью описать с помощью суперпозиции локальных нормально распределенных случайных процессов по координатным направлениям, масштаб дисперсии которых рассчитывается через коэффициенты турбулентности.

На этом этапе расщепления имеем следующее уравнение:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \mu_x \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} \mu_y \frac{\partial \phi}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \mu_z \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad t_j \leq t \leq t_{j+1}. \quad (11)$$

Оператор модели турбулентного обмена в (11) с переменными коэффициентами в рамках метода локальных аппроксимаций заменяется совокупностью операторов с кусочно-постоянными коэффициентами по принципу «замороженных коэффициентов» [12, 13]. Здесь локальность понимается в пространстве значений коэффициентов турбулентности. При таких предположениях каждое локальное относительно μ_s уравнение (11) имеет постоянные коэффициенты и допускает разделение переменных. На каждом шаге по времени $t_j \leq t \leq t_{j+1} = t_j + \Delta t$ трехмерная задача аппроксимируется совокупностью трех одномерных задач, которые решаются аналитически.

Учитывая это обстоятельство, а также взаимосвязи между функциями плотности вероятности нормального распределения и функциями Грина для совокупности диффузионных уравнений, турбулентный процесс рассеяния частиц будем моделировать как суперпозицию гауссовых случайных процессов в окрестности координат точек траекторий (10). Для каждой точки используется свой коэффициент μ_s . Величина шага Δt выбирается также адаптивно к локальным условиям в окрестностях точек $\mathbf{x}^{j+1/2}$ из (10) по схеме (9). При расчете ансамблей адаптация параметров алгоритма осуществляется для каждой частицы индивидуально.

В результате такой организации моделирования приращения координат частиц на этапе турбулентного перемешивания вычисляются следующим образом:

$$\zeta_x = q\sqrt{2\mu_x\Delta t}, \quad \zeta_y = q\sqrt{2\mu_y\Delta t}, \quad \zeta_z = q\sqrt{2\mu_z\Delta t}, \quad (12)$$

где q – нормально распределенные случайные величины с нулевым средним значением и единичной дисперсией. Окончательно координаты частиц рассчитываются по формулам

$$\mathbf{x}^{j+1} = \mathbf{x}^{j+1/2} + \boldsymbol{\xi}, \quad \boldsymbol{\xi} \equiv (\xi_x, \xi_y, \xi_z). \quad (13)$$

Вычисления траекторий каждой частицы продолжаются до достижения «контрольного» момента времени или до попадания частицы в область рецептора, или до выхода за пределы области.

Краевые условия (2) в ЛМП учитываются следующим образом. На верхней и боковых границах области ΔD_c , когда координаты частицы после расчета по формулам (8), (10) и (12), (13) оказываются за пределами области, частица считается прекратившей свое существование, а ее вклад учитывается при оценке потоков примесей через границу. На нижней границе области D_t в модели задается смешанное краевое условие. Для его учета в численную схему вносятся специальные модификации для описания процесса движения частиц в приземном слое с учетом неоднородностей подстилающей поверхности, температурной стратификации и вероятности осаждения на поверхность. В результате такой модификации определяется параметризованная эффективная нижняя граница воздушной массы. Частица движется до тех пор, пока не пересечет эту границу.

3. Численные эксперименты

Для сравнения результатов расчетов на базе используемых моделей был проведен ряд экспериментов по моделированию переноса пассивной примеси в горно-долинной местности. Область, для которой по модели гидротермодинамики атмосферы (3) были получены поля метеоэлементов, необходимых для расчета распространения примеси по модели (1), (2), представляет собой долину, вытянутую с юго-запада на северо-восток. Рельеф местности обуславливает суточные изменения в направлении и силе ветра в исследуемой области. Источник пассивной примеси располагается в центре долины. Моделирование проводилось для летнего периода.

Для расчетов были выбраны три временных интервала продолжительностью по 3 ч каждый. В первом эксперименте рассматривалась ситуация, соответствующая утреннему развитию циркуляций. Второй эксперимент отражает специфику распространения примеси в дневные часы, третий – в вечернее время. Во всех сценариях задавались следующие значения входных параметров: размеры области $\{X = 50 \text{ км}, Y = 48 \text{ км}, H = 2,5 \text{ км}\}$, шаги сеточной области $\{\Delta x = \Delta y = 2000 \text{ м}, \Delta z_k = 100 \text{ м}\}$, «базовый» шаг по времени в эйлеровой модели $\Delta \tau = 10 \text{ с}$, коэффициенты турбулентной диффузии $\mu_{cx} = \mu_{cy}$ вычислялись по модели Смагоринского, вертикальный коэффициент $\nu_c = 3 \text{ м}^2/\text{с}$. Источник выброса загрязнителя полагался мгновенным. Его координаты: $\{x = 28 \text{ км}, y = 24 \text{ км}, z = 100 \text{ м}\}$. Примесь предполагалась невесомой, т.е. $w_c = 0 \text{ м/с}$. При расчетах по модели лагранжева типа действие источника задавалось единовременным выбросом 1000 частиц.

Для выбранной расчетной области летняя утренняя циркуляция характеризуется ослаблением развившихся ночью нисходящих по склонам потоков воздуха, слабым ветром вдоль долины, началом прогрева дна долины и формированием восходящих потоков. На рис. 1 представлен фрагмент вертикального разреза поля ветра и концентрации примеси при $x = 28$ км.

Рис. 1, *а* соответствует результатам расчетов по эйлеровой модели, рис. 1, *б* — по лагранжевой. Изолинии на рис. 1, *а* показывают концентрацию примеси в долях от 1000 через 1 ч после выброса. Точки на рис. 1, *б* изображают частицы примеси. Так как движение трехмерное, то вертикальный разрез отражает только часть его сложной структу-

ры. На рис. 1, *б* хорошо видно перемещение частиц

примеси в циркуляционной ячейке, образованной восходящими потоками воздуха со дна долины и нисходящими потоками со склонов.

На рис. 2 и 3 даны аналогичные разрезы полей концентрации примеси и ветра для дневного и вечернего времени через 1 ч после выброса загрязнения. Дневная циркуляция характеризуется восходящими потоками вдоль нагретых склонов и слабыми движениями воздушной массы в долине. Вечером сначала начинает остывать юго-восточный склон, в результате чего формируются потоки воздушных масс от более холодного склона к более теплову.

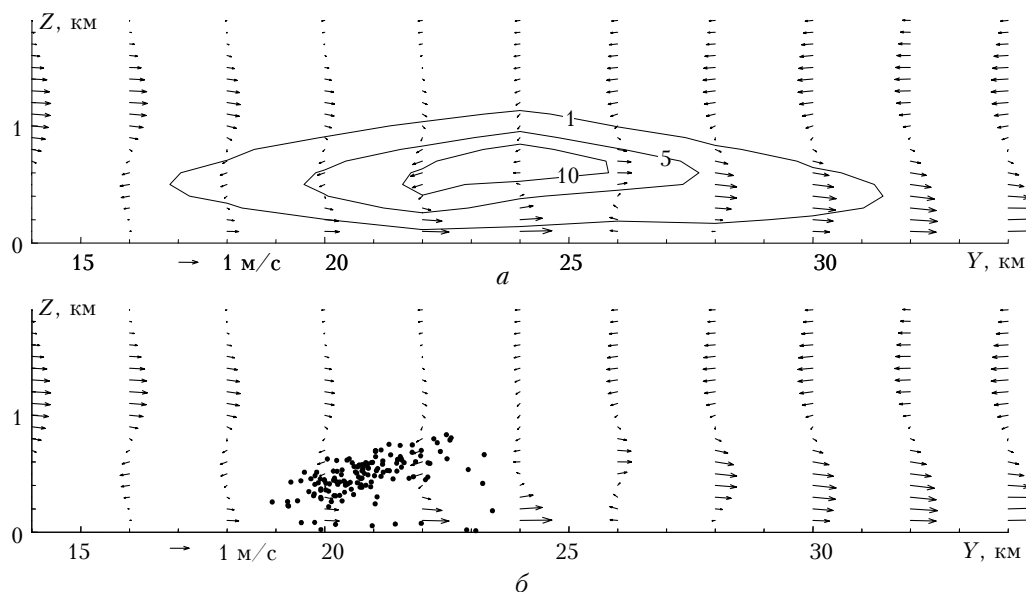
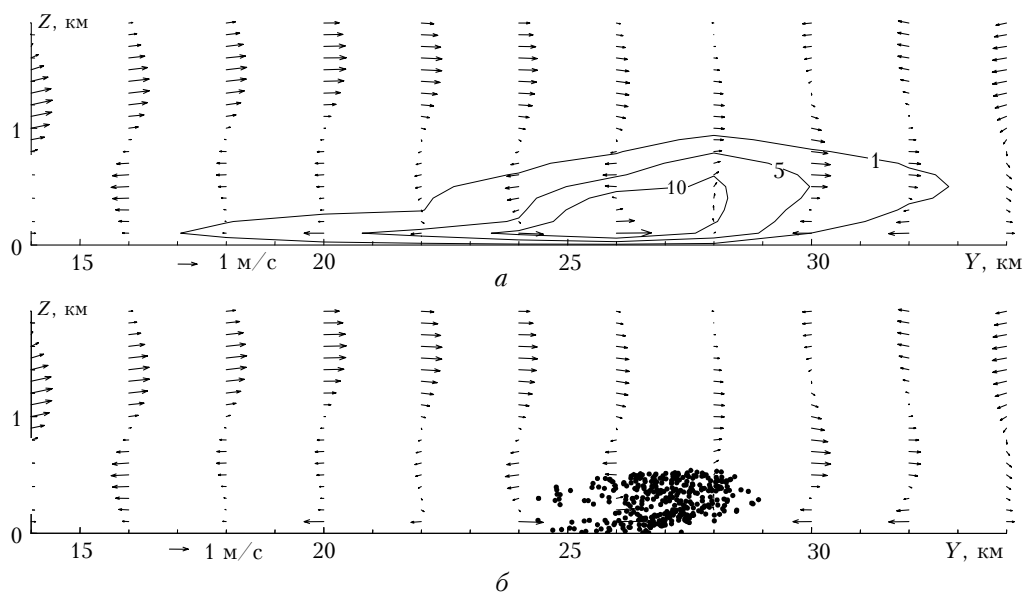


Рис. 1. Вертикальные разрезы полей ветра и концентрации примеси при $x = 28$ км через 1 ч после выброса: *а* — эйлерова постановка; *б* — лагранжева. Утренний режим циркуляции



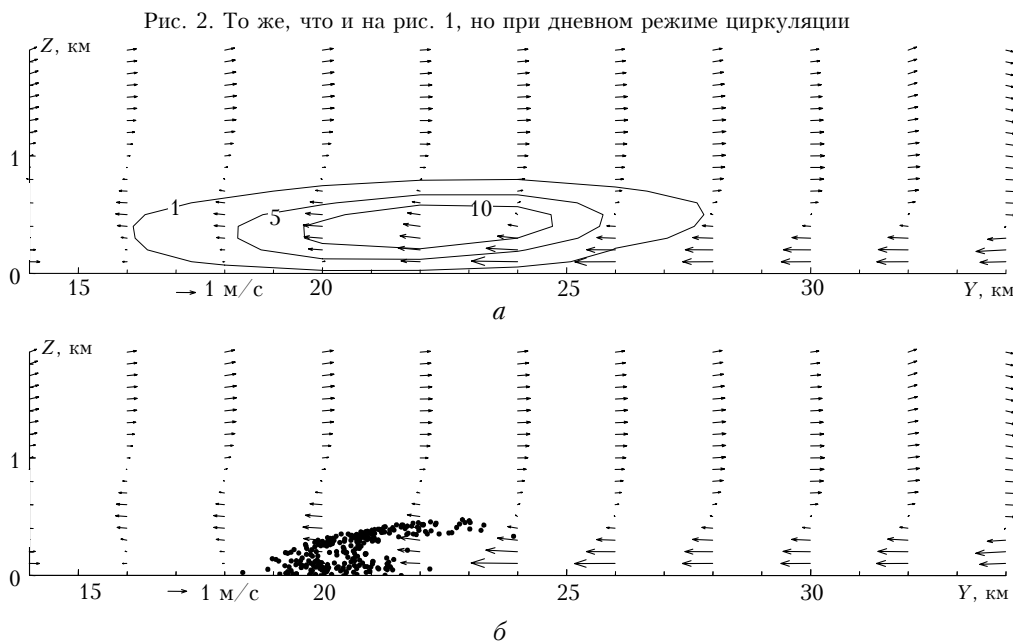


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, но при вечернем режиме циркуляции

Сравнение показывает, что результаты моделирования распространения примеси по обеим моделям качественно согласуются. Облако загрязнения во всех случаях движется по направлению ветра. Более размытые картины, получаемые при эйлеровом подходе, объясняются тем, что в этом случае разрешающий оператор неявной схемы, даже при условиях (9), имеет относительно широкую область влияния. Это свойство проявляется в эффектах сглаживания решения. Чтобы их ослабить, нужно повысить разрешение дискретных схем. В лагранжевом подходе в условиях (9) можно работать в диапазоне подсеточных масштабов и таким образом получать детальное воспроизведение эволюции процессов.

Заключение

Описаны алгоритмы реализации моделей переноса примесей в атмосфере в рамках эйлерова и лагранжева подходов, разрабатываемых в ИВМиМГ СО РАН.

Используемые модификации численных моделей переноса примесей реализованы в виде комплекса программ, согласованных на уровне информационных массивов и адаптированных для работы с моделями генерации полей гидрометеоэлементов в атмосфере.

Анализ сценариев моделирования показал, что оба подхода в целом дают похожие результаты. Что касается специфики реализации, то алгоритмы обеих моделей требуют адаптации к интенсивности процессов. Эйлерова модель работает в традиционном для этого типа моделей стиле и дает отображение общего характера процессов во всей области. Моделью лагранжева типа легче управлять в режи-

ме слежения за интенсивностью процессов. Ее вычислительное ядро может легко адаптироваться к различным ситуациям. Это дает возможность подключать модель, например, в тех случаях, когда требуется более детально воспроизводить развитие процессов в характерных локальных зонах и в областях, примыкающих к источникам эмиссии и стока примесей.

Таким образом, обе версии модели дополняют друг друга и могут использоваться для прогностических и диагностических целей при изучении природных процессов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 04-05-64562), программ Президиума РАН № 16 и ОМН РАН № 1.3, а также проекта Европейской комиссии (контракт № 013427).

1. Pielke R.A., Lyons W.A., McNider R.T., Moran M.D., Moon D.A., Stocker R.A., Walko R.L., Uliasz M. Regional and mesoscale meteorological modeling as applied to air quality studies // Air Pollution Modelling and its Applications. 1991. V. VIII. P. 259–289.
2. Draxler R.R., Hess G.D. An overview of the HYSPLIT 4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition // Austral. Meteorol. Magazine. 1998. N 47. P. 295–308.
3. Mahura A., Baklanov A. Evaluation of source-receptor relationship for atmospheric pollutants using trajectory modeling and probability fields analysis. Danish Meteorol. Institute, 2003. 03–15.
4. Пененко В.В., Цветова Е.А. Моделирование процессов переноса примесей в прямых и обратных задачах климатоэкологического мониторинга и прогнозирования // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 6. С. 482–487.
5. Пененко В.В., Цветова Е.А. Некоторые аспекты решения взаимосвязанных задач экологии и климата //

- Прикл. мех. и техн. физ. 2000. Т. 41. № 5. С. 161–170.
6. *Пененко В.В., Цветова Е.А.* Методика оценок роли индустриального региона в крупномасштабных процессах загрязнения атмосферы // Проблемы физики пограничного слоя атмосферы и загрязнения воздуха. СПб.: Гидрометеоздат, 2002. С. 10–29.
 7. *Пененко В.В., Алоян А.Е.* Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
 8. *Пьянова Э.А.* Моделирование микроклиматических особенностей межгорных котловин // Сер. «Математическое моделирование и современные информационные технологии». Вып. 4. Современные проблемы математического моделирования: Сб. трудов XI Всерос. школы-семинара. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. ун-та, 2005. С. 341–348.
 9. *Пененко В.В.* Численные схемы для адвективно-диффузионных уравнений с использованием локальных сопряженных задач. Препр. / ВЦ, Сиб. отд-ние РАН (Новосибирск). 1993. № 948. С. 1–50.
 10. *Петровский И.Г.* Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1964. 272 с.
 11. *Годунов С.И., Рябенский В.С.* Разностные схемы. М.: Наука, 1973. 400 с.
 12. *Рождественский Б.Л.* Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике. М.: Наука, 1968. 592 с.
 13. *Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М.* Численные методы. М.; СПб.: Физматлит, 2000. 622 с.

V.V. Penenko, E.A. P'yanova, A.V. Chernova. **Investigation of processes of mesoscale transport of admixtures with the use of models of Euler and Lagrange types.**

A complex of models of mesoscale transport of admixtures is presented including the determinate model in terms of Euler and determinate-stochastic model in terms of Lagrange approach. The results of comparative experiments on modeling the admixture transport within ranges of complex geometry are described.