

Численное исследование влияния водоема на перенос примеси от точечного источника*

Э. А. Пьянова

*Институт вычислительной математики
и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
e-mail: Pyanova@ommgr.sscs.ru*

An equation of turbulent transport is used for modeling the spatial-temporal variability of concentrations of a passive tracer. A three-dimension mesoscale non-hydrostatic model of atmospheric hydrodynamics over a complex terrain is applied for modelling of the atmospheric circulation above the thermally and topographically inhomogeneous underlying surface. Thermal inhomogeneity of the Earth surface is a result of the combined influence of a water reservoir and an urban heat island, as well as daily variations of the insulation of the slopes. For an estimation of the effect of a water reservoir on the transport of pollutants we perform the calculations for both scenarios (with and without water) in the reservoir. We present the results of several numerical experiments with different location of pollution sources near the city and water reservoir.

Введение

На характер распространения атмосферной примеси влияют физико-химические свойства самой примеси и метеорологические особенности несущей среды. Вариации гидротермодинамических характеристик атмосферы очень разнообразны. Они зависят от взаимодействия факторов различного масштаба, например фоновых полей метеоэлементов и локальных атмосферных циркуляций, вызванных термической и орографической неоднородностью подстилающей поверхности. Термическая неоднородность поверхности в свою очередь является следствием неравномерной инсоляции склонов, чередования водных поверхностей и суши, различий в альбедо и др. Модель, учитывающая эти факторы и взаимодействия, создается и в ИВМиМГ СО РАН. Она базируется на вариационных принципах с использованием прямых и сопряженных задач и методов теории чувствительности для моделей гидродинамики атмосферы, переноса и трансформации примесей [1–4]. В зависимости от постановок задач строятся различные модификации моделей в режиме прямого и обратного моделирования.

В данной работе представлена модификация модели для решения трехмерной мезомасштабной задачи переноса пассивной примеси в режиме прямого моделирования. Для расчета характеристик гидродинамического фона атмосферы как несущей среды используется негидростатическая мезомасштабная модель динамики атмосферы в

*Работа выполнена при финансовой поддержке Программы № 16 Президиума РАН, Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 07-05-00673), Программы № 3 Отделения математических наук РАН, контракта Европейской Комиссии (грант № 013427).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2008.

областях со сложным рельефом подстилающей поверхности. Учет рельефа осуществляется на базе метода фиктивных областей. Рассматривается влияние водного объекта на процессы распространения пассивной примеси. Приводятся результаты моделирования циркуляций атмосферы и переноса примеси для летнего периода в двух вариантах: над орографически однородной поверхностью и в горно-долинной области. Для оценки влияния водоема на эти процессы проведены параллельные расчеты сценариев с водоемом и без него.

Для моделирования пространственно-временной изменчивости пассивной однокомпонентной примеси исходным является уравнение переноса с турбулентной диффузией:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{u} \text{grad} c = \Delta_c c + f(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями

$$c(\mathbf{x}, t) = c^0(\mathbf{x}), \quad t = 0, \quad \frac{\partial c}{\partial x} = 0, \quad x = 0, X, \quad \frac{\partial c}{\partial y} = 0, \quad y = 0, Y, \\ \frac{\partial c}{\partial z} = 0, \quad z = H, \quad \nu_c \frac{\partial c}{\partial z} = (\beta_c - w_c)c + f_0(x, y, t), \quad z = \delta(x, y) + h. \quad (2)$$

Здесь c — концентрация примеси; c^0 — поле концентрации примеси в начальный момент времени; t — время; $\mathbf{x} = (x, y, z)$ — декартовы координаты; w_c — скорость оседания примеси; β_c — параметр, характеризующий взаимодействие примеси с подстилающей поверхностью; f, f_0 — функции источников; $\delta(x, y)$ — функция, описывающая рельеф местности; h — высота приземного слоя.

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

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div} \rho u \mathbf{u} = -\frac{\partial p'}{\partial x} + l \rho v + \Delta_u u, \quad \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div} \rho v \mathbf{u} = -\frac{\partial p'}{\partial y} - l \rho u + \Delta_v v, \\ \frac{\partial \rho w}{\partial t} + \text{div} \rho w \mathbf{u} = -\frac{\partial p'}{\partial z} + \lambda \rho \vartheta' + \Delta_w w, \quad \frac{\partial \rho \vartheta'}{\partial t} + \text{div} \rho \vartheta' \mathbf{u} = -S \rho w + \rho \frac{L_w}{c_p} \Phi + \Delta_\vartheta \vartheta', \quad (3) \\ \frac{\partial \rho q'}{\partial t} + \text{div} \rho q' \mathbf{u} = -\rho w \frac{\partial Q}{\partial z} - \rho \Phi + \Delta_q q', \quad \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0.$$

Здесь $\mathbf{u} = (u, v, w)$, u, v, w — компоненты вектора скорости ветра в направлениях x, y, z соответственно; ϑ', q' и p' — отклонения потенциальной температуры, удельной влажности и атмосферного давления от их фоновых значений; ρ — плотность воздуха; Q — фоновая удельная влажность; L_w — скрытая теплота конденсации; Φ — скорость образования жидкой фазы; c_p — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; l — параметр Кориолиса; S — параметр стратификации; λ — параметр плавучести. Фоновые поля, описывающие крупномасштабные атмосферные движения, в данной работе предполагаются известными.

Оператор Δ_α ($\alpha = c, u, v, w, \theta, q$) 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 $\mu_{\alpha x}$, $\mu_{\alpha y}$ и $\mu_{\alpha z}$ — коэффициенты турбулентной диффузии в направлении координат x , y и z соответственно.

Граничные условия для задачи (3) выбирались следующим образом. На боковых границах области ставятся однородные условия Неймана. На верхней границе задается затухание возмущений метеоэлементов. Влияние орографических и термических неоднородностей подстилающей поверхности учитывается в краевых условиях на нижнем расчетном уровне модели, который совпадает с верхней границей приземного слоя. Применение теории приземного слоя приводит к условиям третьего рода в задачах для расчета метеоэлементов [5]. Таким образом, уравнения гидротермодинамики атмосферы и уравнение модели переноса (1), (2) интегрируются в области $D_t = D \times [0, T]$, где $D = \{0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y; \delta(x, y) + h \leq z \leq H\}$ — область изменения пространственных переменных; $\delta(x, y)$ — функция рельефа; h — высота приземного слоя; $0 \leq t \leq T$ — интервал времени.

В модели также рассчитываются поток солнечной радиации, получаемый земной поверхностью, с учетом наклона и ориентации склонов относительно азимута Солнца и температура подстилающей поверхности. Затем в блоке параметризации приземного слоя вычисляются потоки тепла на верхней границе слоя, которые участвуют в нижних краевых условиях в модели динамики атмосферы. Для учета рельефа использовались идеи метода фиктивных областей [6, 7]. С полученными полями скорости ветра решается задача переноса пассивной примеси (1) и (2).

1. Численная реализация модели

Поскольку концентрация примесей в физическом смысле не может быть отрицательной, для реализации численных моделей, основанных на уравнении переноса с турбулентной диффузией, важно использовать конечно-разностные схемы, обладающие свойством монотонности. В данной работе построение численного алгоритма для модели переноса примеси (1) и (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 [8]. Вариационный принцип использовался в сочетании с методом расщепления: исходная многомерная задача на каждом шаге по времени аппроксимировалась совокупностью последовательно решаемых одномерных задач.

Таким образом, для решения уравнения переноса примеси в работе построены устойчивые, монотонные, балансные и транспортные разностные схемы, обеспечивающие неотрицательность концентраций, выполнение закона сохранения массы и перенос примеси по направлению потока несущей среды [8]. Аналогичные схемы используются и для аппроксимации операторов переноса и турбулентного обмена в модели динамики атмосферы (3).

Для численной реализации математической модели гидротермодинамики атмосферы (3) с начальными и краевыми условиями также использовались вариационный принцип и методы расщепления [1, 2, 9]. Предложенная модификация численной модели реализована в виде комплекса программ.

2. Численные эксперименты

Для исследования процесса распространения загрязнения в атмосфере над территориями с различными формами рельефа проведен ряд численных экспериментов: моделировался перенос пассивной примеси от точечного источника над орографически плоской поверхностью и в горно-долинной местности в летний период.

Для исследования влияния водоема проводились расчеты с двумя вариантами задания характеристик подстилающей поверхности: с водоемом и без него. Сначала для каждого из вариантов по модели динамики атмосферы (3) рассчитывались метеорологические поля. Затем с полученными метеополями как входными данными для задачи переноса и турбулентной диффузии (1) и (2) в предположении, что $w_c = 0$ м/с, находились поля концентрации примеси. Для иллюстрации различий в распределении загрязнения в “параллельных” расчетах вычислялись поля разностей концентраций, т. е. для каждого момента времени в каждой расчетной точке области посчитана разность значений концентрации примеси, когда водоем в области есть и когда его нет. Разности нормированы на максимальное значение, найденное среди значений концентрации в обоих расчетах в данный момент времени по всей области. В численных экспериментах источник выброса загрязнения полагался постоянно действующим и выбрасывающим единицу массы за один интервал времени Δt . В сценариях предполагалось отсутствие фонового ветра.

Эксперимент 1. Область с плоской орографией. Размеры области: $X = 40$ км, $Y = 40$ км, $H = 3$ км. Размеры сетки $81 \times 81 \times 38$. Пространственные шаги сетки: по горизонтали $\Delta x = \Delta y = 500$ м, по вертикали $\Delta z_1 = 20$ м, $\Delta z_k = 80$, $k = \overline{2,38}$ м; шаг по времени $\Delta t = 60$ с.

Распределение нормированных разностей концентраций в некоторые моменты времени представлено на рисунках в виде горизонтальных разрезов на высоте источника ($z = 20$ м). Левый прямоугольник изображает положение водоема, правый прямоугольник — город. Источник расположен в середине левой границы водоема. На рис. 1, а

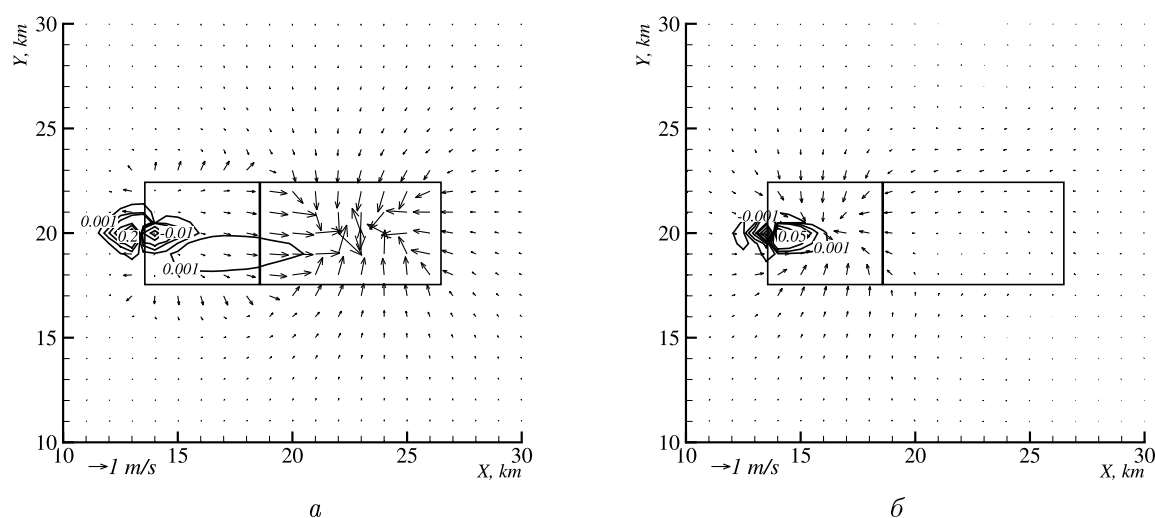


Рис. 1. Скорости ветра и изолинии нормированных разностей концентрации примеси на высоте источника примеси 20 м: в 12 ч (а) и в 24 ч (б) местного времени

проиллюстрированы различия в распределении примеси в дневное время, когда бризовый ветер направлен от водоема, а на окраинах города потоки направлены к центру городского острова тепла. Видно, что дневная бризовая циркуляция, вызванная наличием водоема, способствует большему выносу примеси за пределы его территории, в том числе и в направлении города. Ночная атмосферная циркуляция, наоборот, способствует накоплению примеси над водоемом, так как вода ночью теплее окружающей подстилающей поверхности (рис. 1, б). Так как движение четырехмерное, горизонтальные разрезы отражают только часть сложной структуры полей концентрации примеси.

Эксперимент 2. Горно-долинная область. В качестве модельной области выбрана Читино-Ингодинская впадина, в которой располагаются г. Чита и оз. Кенон. Исследуемый район, фрагмент которого изображен на рис. 2, представляет собой долину, вытянутую с юго-запада на северо-восток.

Как и в предыдущем эксперименте, для горно-долинной области проведено два сценарных расчета с озером и без него. Параметры расчетной области: $X = 50$ км, $Y = 48$ км, $H = 3$ км; размеры сетки $26 \times 25 \times 31$; сеточные шаги $\Delta x = \Delta y = 2000$ м, $\Delta z = 100$ м; шаг по времени $\Delta t = 60$ с. Точечный источник пассивной примеси располагается в центре долины на северо-западном берегу озера. Высота источника над рельефом составляет 100 м.

В отсутствие водных объектов динамика атмосферы определяется прежде всего суточным ходом метеоэлементов, зависящим от высоты солнца и рельефа. Через изменение местных циркуляций озеро Кенон оказывает существенное влияние и на распространение примесей в атмосфере. На рис. 3 представлены изолинии разностей концентраций примеси на высоте 100 м над рельефом. Рельеф местности обуславливает развитие горно-долинного ветра, который взаимодействует с бризовыми циркуляциями над водоемом и городом. Днем, когда водоем холоднее окружающей поверхности, ветер дует с воды на сушу, усиливая восходящие потоки вдоль склонов, при этом картина распределения примеси (рис. 3, а) качественно повторяет вариант расчетов с плоской орографией (см. рис. 1, а). Во второй половине дня примесь переносится долинным ветром в юго-западном направлении. Ночью и утром, когда температура водоема выше температуры окружающей поверхности и ветер дует с суши на воду, примесь за счет

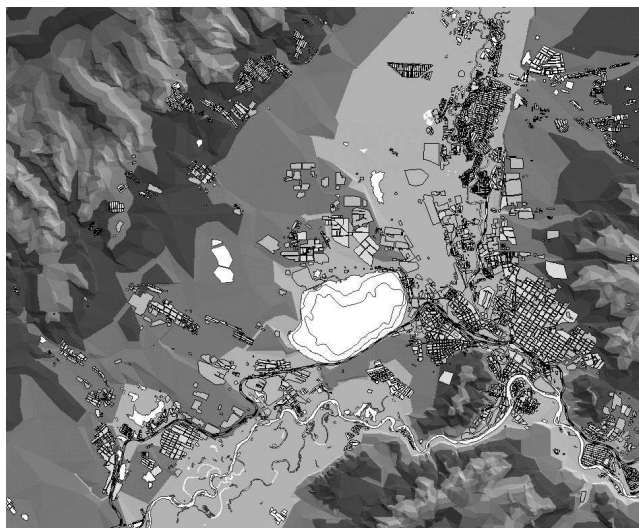


Рис. 2. Фрагмент моделируемой области

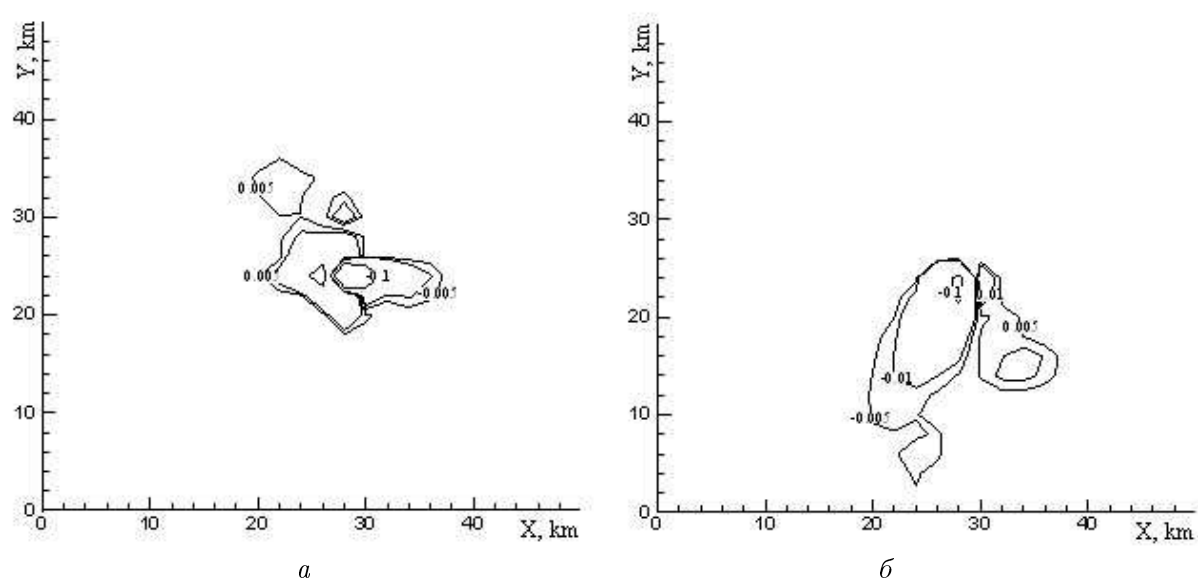


Рис. 3. Изолинии нормированных разностей концентрации примеси на высоте источника примеси 100 м в 12 ч (а) и 24 ч (б) местного времени. Координаты источника $x = 28$ км, $y = 24$ км

восходящих потоков над озером поднимается вверх, но не рассеивается из-за ночных инверсий, а переносится ветром вдоль боковой долины назад, в основную, усиливая загрязнение над городом (рис. 3, б).

Таким образом, наличие водоема заметно влияет на распространение примеси от точечного источника. Это влияние может сказываться как в ослаблении атмосферного загрязнения близлежащего города и усилении загрязнения самого водоема днем, так и в увеличении концентрации загрязняющей примеси над городом ночью.

Заключение

Сравнительный анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что наличие водоема на исследуемой территории влияет на формирование локальных циркуляций и, соответственно, на распределение примесей в атмосфере. Зона заметного влияния простирается от водоема на расстояния, сравнимые с размерами водного объекта. Используемая численная модель может быть достаточно быстро и легко настроена для сценарных расчетов полей метеоэлементов над территориями с орографией разного типа. Предполагается продолжение работы с данной моделью для расчетов распределений атмосферных загрязнений над территориями со сложным рельефом для других сезонов года, а также с учетом фоновых потоков ветра.

Список литературы

- [1] Пененко В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 352 с.
- [2] Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.

- [3] 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.: Гидрометеоиздат, 2002. С. 10–29.
- [4] ПЬЯНОВА Э.А. Моделирование микроклиматических особенностей межгорных котловин // Совр. пробл. мат. моделирования: Сб. тр. XI Всерос. школы-семинара. Ростов н/Д: Изд-во Рост. гос. ун-та, 2005. С. 341–348.
- [5] КАЗАКОВ А.Л., ЛАЗРИЕВ Г.Л. О параметризации приземного слоя атмосферы и деятельного слоя почвы // Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 4, № 3. С. 257–265.
- [6] ФАЛЕЙЧИК А.А. Использование методов математического моделирования при оценке возможных изменений микроклимата // Обзорение прикладной и промышленной математики. 1996. Т. 3, вып. 3. С. 434–449.
- [7] ФАЛЕЙЧИК А.А., ФАЛЕЙЧИК Л.М., СТОЛЯРОВ А. А. Математическое моделирование локальных циркуляций атмосферы в районе Удоканского месторождения // Математический анализ и его приложения. Чита: ЗабГПУ, 2000. Вып. 4. С. 83–95.
- [8] ПЕНЕНКО В.В. Численные схемы для адвективно-диффузионных уравнений с использованием локальных сопряженных задач. Новосибирск, 1993 (Препр. РАН. Сиб. отд-ние. ВЦ. № 984).
- [9] МАРЧУК Г.И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1977. 456 с.

Поступила в редакцию 21 февраля 2008 г.