

М.Г. Коротков

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСИ В АТМОСФЕРЕ ПРОМЫШЛЕННОГО РЕГИОНА В ОТСУТСТВИЕ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ЕГО ТЕРРИТОРИИ

ИВМ и МГ СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 18.01.99 г.

Принята к печати 5.05.99 г.

Рассматривается трехмерная модель переноса примеси. В случае поступления примеси через границу и отсутствия в области источников формируются зоны повышенной и пониженной объемной концентрации. Объектом численных экспериментов представлен Новосибирский промышленный регион.

Исследование качества атмосферы крупных промышленных центров и окружающих территорий методами математического моделирования предполагает создание моделей, описывающих процессы распространения примесей в воздушной среде. Формирование поля концентрации примеси происходит на фоне атмосферной циркуляции, создавшейся в результате взаимодействия крупномасштабного движения воздушной массы с орографическими и термическими неоднородностями поверхности Земли. При этом наличие крупного города и, как правило, водного объекта значительного размера, выступающих в зависимости от сезона и времени суток либо островом тепла, либо островом холода, существенно усиливает влияние подстилающей поверхности на формирование поля ветра, а следовательно, на характер распространения примесей. Очевидно, что пространственно-временное распределение источников примеси и их мощности также относятся к основополагающим факторам, обуславливающим формирование поля концентрации примесей.

Влияние на качество воздуха источников, расположенных непосредственно на территории промышленного региона, обсуждалось в работах [1, 2]. В настоящей работе делается попытка исследовать влияние внешних по отношению к рассматриваемой области источников примеси, зачастую удаленных на значительные расстояния.

1. Математическая модель

Рассмотрим трехмерное уравнение переноса примеси с учетом турбулентной диффузии, записанное в декартовой системе координат ($\mathbf{x} = (x, y, z)$):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u \varphi}{\partial x} + \frac{\partial v \varphi}{\partial y} + \frac{\partial w \varphi}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} = f. \quad (1)$$

Здесь $\varphi = \varphi(\mathbf{x}, t)$ – объемная концентрация примеси; u, v, w – компоненты вектора скорости примеси \mathbf{u} ; k_x, k_y, k_z – коэффициенты турбулентности; $f = f(\mathbf{x}, t)$ – функция источников примеси (u, v, w, k_x, k_y, k_z полагаются известными).

Пусть задача (1) решается в области Ω с границей Γ . Начальные условия задачи:

$$\varphi(\mathbf{x}, 0) = \varphi_0(\mathbf{x}). \quad (2)$$

Граничные условия заданы следующим образом:

$$\begin{cases} \varphi|_{\mathbf{x} \in \Gamma} = g(\mathbf{x}, t), \text{ если } \mathbf{u}_n(\mathbf{x}, t) \text{ направлен внутрь } \Omega, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n}|_{\mathbf{x} \in \Gamma} = 0 \quad \text{— иначе.} \end{cases} \quad (3)$$

Здесь \mathbf{u}_n – нормальная к Γ составляющая вектора скорости \mathbf{u} .

Поскольку рассматривается процесс переноса примеси в атмосфере, не являющейся несжимаемой средой, дивергенция вектора скорости не равна нулю:

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \neq 0. \quad (4)$$

Рассмотрим конкретную постановку задачи. Предположим отсутствие внутренних источников примеси ($f \equiv 0$ в (1)) в Ω . Примесь поступает в область только через границу Γ .

Пусть

$$\varphi_0(\mathbf{x}) \equiv g(\mathbf{x}, t) \equiv \psi \equiv \text{const}. \quad (5)$$

Это означает, что в начальный момент времени во всей области концентрация примеси была постоянной и равной концентрации примеси, поступающей через границу в течение всего времени, что можно интерпретировать следующим образом: источник примеси удален и примесь, достигнув границы региона, успевает в определенной мере рассеяться.

Очевидно, что в силу (4) даже при условии (5) $\varphi(\mathbf{x}, t) \equiv \text{const}$ не является решением (1) ($\varphi \equiv \text{const}$ не является решением и в общем случае).

Таким образом, в области сформируются зоны повышенной и пониженной концентрации примеси, пространственно-временное распределение которых обусловлено структурой поля скорости.

2. Численные эксперименты

В качестве объекта исследований в численных экспериментах рассматривался Новосибирский промышленный регион (рис. 1). Компоненты вектора скорости и коэффициенты турбулентности рассчитывались с помощью модели динамики атмосферы, представленной в [1, 2], поэтому в качестве вертикальной координаты в модели переноса

примеси использовалась $\sigma = (p - p_s)/(p_s - p_t)$ – координата. Здесь p – давление; p_s, p_t – давление на нижней и верхней границах воздушной массы. Все рассуждения, приведенные в п. 2 для задачи в декартовой системе координат, остаются справедливыми и в данном случае.

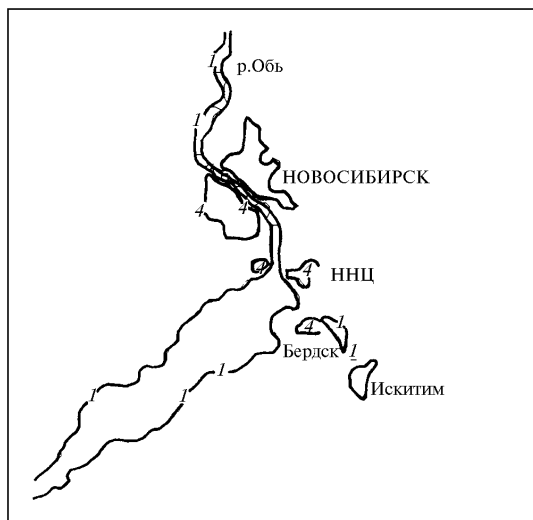


Рис. 1. Новосибирский промышленный регион: 4 – граница городской территории; 1 – граница водных объектов

Для дискретизации адвективных членов уравнения переноса применялись монотонные балансные численные схемы с нелинейной ренормализацией адвективных потоков [3]. Операторы турбулентного обмена аппроксимировались по пространству трехточечными схемами второго порядка точности. Интегрирование задачи осуществлялось с использованием двуциклического метода расщепления [4, 5].

Цель данного исследования состоит в том, чтобы выявить характер распространения примесей в условиях атмосферной циркуляции над городом. Поэтому примесь рассматривается как пассивный трассер, а концентрации ее задаются и рассчитываются в относительных единицах. В соответствии с условиями (3), (5) концентрация примеси, поступающей через границу, полагалась равной единице.

При проведении численных экспериментов наибольший интерес представляло рассмотрение метеорологических ситуаций, типичных для того или иного сезона года. Это обусловлено тем, что в течение сезона орографические и динамические характеристики подстилающей поверхности изменяются незначительно, а ее температура изменяется в режиме суточного хода [6]. При расчетах компонент вектора скорости и коэффициентов турбулентности в модели динамики атмосферы температура подстилающей поверхности задавалась по суточному ходу в виде периодической функции с учетом категорий землепользования и сезона года.

В качестве примера приводятся фрагменты сценария моделирования атмосферной циркуляции и переноса примеси для осеннего сезона при юго-западном фоновом потоке (рис. 2–5). Скорость фоновых потоков воздушных масс задавалась в модели равной 10 м/с на уровне 700 ГПа. В расчетах использовалась сеточная область по горизонтали 26×26 точек с шагом 4 км и 10 уровней по вертикали. Более подробно модель, методика расчетов и организация сценариев моделирования описаны в [1, 2]. Здесь показаны двумерные горизонтальные разрезы рассчитанных полей функции состояния на высоте 50 м над уровнем рельефа местности. На рис. 2, 3 – поле концентрации примеси в относительных единицах

на рис. 4, 5 – горизонтальное поле скорости ветра. В точках с малой скоростью стрелочки отмечены квадратиками. Как в ночное, так и в дневное время Новосибирское водохранилище выступает мощным островом тепла, однако контраст температур «вода–суша» ночью возрастает. Городская территория также теплее окрестностей. Взаимодействие фоновых потоков с подстилающей поверхностью приводит к формированию сложной структуры атмосферной циркуляции. В области образуются плохо проветриваемые участки в подветренных зонах островов тепла, что, в свою очередь, способствует созданию неоднородностей структуры поля концентрации. Максимумы концентрации наблюдаются как в подветренных окрестностях локальных островов тепла, так и в подветренной зоне мощного острова тепла, каким совместно выступают г. Новосибирск и водохранилище.

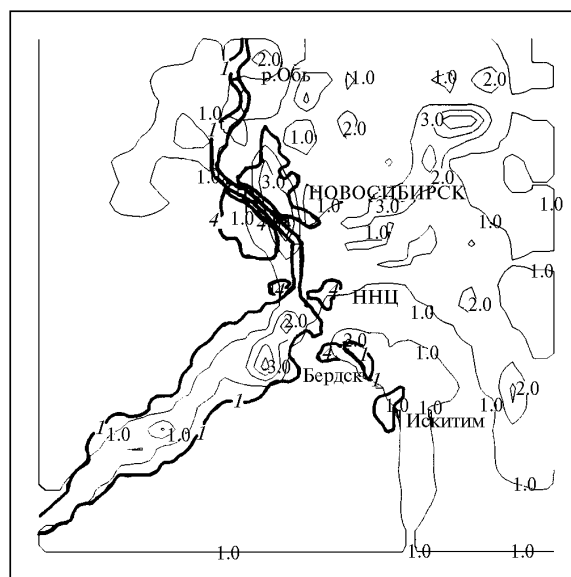


Рис. 2. Поле концентрации примеси (50 м над уровнем рельефа) в регионе при юго-западном фоновом потоке (10 м/с). Осень, 6 ч местного времени

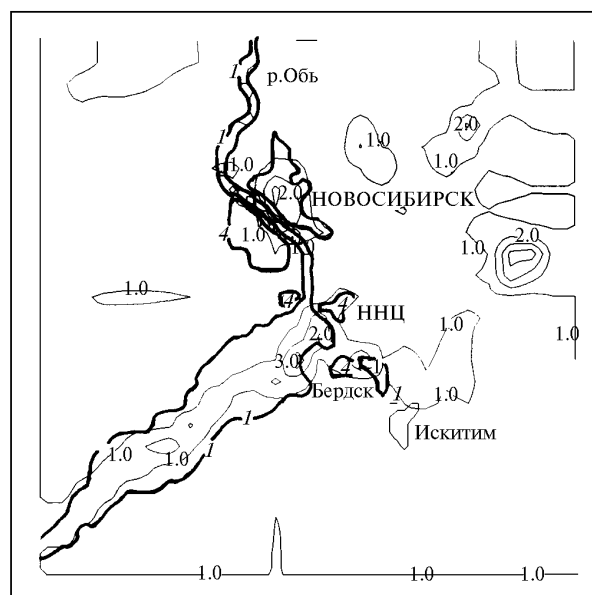


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для 15 ч местного времени

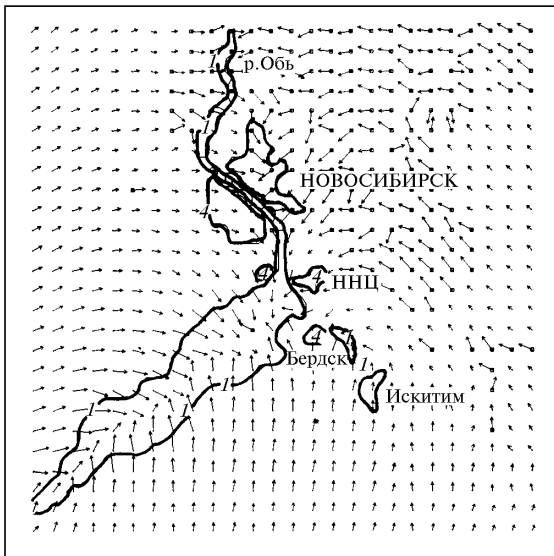


Рис. 4. Горизонтальная структура поля ветра (50 м над уровнем рельефа) при тех же условиях, что и на рис. 2

3. Заключение

Анализ результатов численных экспериментов показывает, что при такой формулировке модели переноса, даже при однородных начальных и граничных условиях и отсутствии источников загрязнений на территории региона, в полях концентраций примеси проявляются неоднородности, обусловленные особенностями локальной атмосферной циркуляции. Это значит, что различные части региона будут испытывать различные антропогенные нагрузки. Расположение зон минимумов и максимумов концентрации определяется в первую очередь характеристиками подстилающей поверхности и наличием орографических неоднородностей. Влияние же направления фонового потока начинает сказываться при скоростях больше 4–5 м/с и увеличивается с ростом его скорости. В реальных условиях качество атмосферы зависит от интенсивности выброса загрязняющих веществ источниками, расположенными на территории региона, и от их потока через границы области, т.е. от удаленных

M.G. Korotkov. Peculiarities of Formation of Pollutant Concentration Field in the Atmosphere above Industrial Region in the Absence of Pollution Sources on Its Territory.

A three-dimensional model of pollutant transfer is considered. The domains of increased and decreased volume concentration are formed for the case of income of pollutants across the boundary and in the absence of sources inside the area. The Novosibirsk industrial region is the object of numerical experiments.

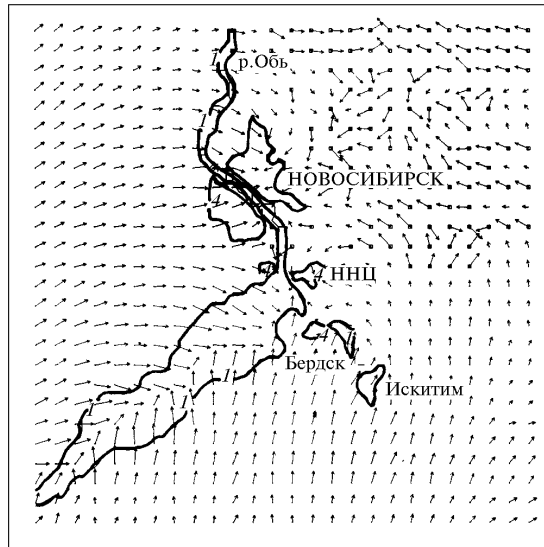


Рис. 5. То же, что на рис. 4, для 15 ч местного времени

источников. И только совместное использование моделей динамики атмосферы и переноса примесей с результатами наблюдательных экспериментов дает возможность обнаружить закономерности в распределении загрязняющих примесей и специфику их проявления в конкретных метеорологических ситуациях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 97-05-6511, 98-05-65318 и Интеграционного гранта СО РАН-97 №30.

1. Пененко В.В., Коротков М.Г. // Оптика атмосферы и океана. Т. 10. № 6. 1997. С. 590–597.
2. Пененко В.В., Коротков М.Г. // Оптика атмосферы и океана. Т. 11. № 6. 1998. С. 567–572.
3. Bott A.A. // Mon. Wea. Rev. 1989. V. 117. P. 1006–1015.
4. Марчук Г.И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 304 с.
5. Пененко В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 352 с.
6. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 752 с.