

В.В. Пененко, М.Г. Коротков

## ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ СИТУАЦИЙ В АТМОСФЕРЕ

Обсуждаются вопросы организации и применения численных моделей гидротермодинамики атмосферы и переноса примесей для изучения и прогнозирования ситуаций в климатической системе городов и промышленных регионов, экологически неблагоприятных и аварийных по отношению к режимам переноса и накопления загрязняющих веществ в атмосфере от антропогенных и естественных источников.

### 1. Введение

Вопрос о качестве и прогностических возможностях мезомасштабных моделей гидротермодинамики и загрязнения атмосферы становится весьма существенным, когда их необходимо использовать для решения конкретных задач окружающей среды, связанных с экологической безопасностью для населения и природных комплексов. В последнее время этот вопрос приобретает особую остроту в связи с повышенным риском техногенных аварий практически во всех отраслях хозяйственной деятельности в России и СНГ.

Модели такого класса характеризуются высоким пространственно-временным разрешением, и для обеспечения расчетов они требуют большого объема фактической информации о текущем состоянии климатической системы. Поэтому они обычно хорошо работают для оценок ситуаций в сценарном режиме, когда не довлеет дефицит времени на подготовку решения и имеется значительная степень свободы в выборе входных данных.

Главное для работы в аварийных и экстремальных ситуациях и в конкретном районе – это оперативная и адекватная инициализация моделей и выдача прогноза. При этом фактор времени является определяющим для принятия решения по оценке масштабов воздействия и мер по ослаблению его отрицательных последствий. Следовательно, инициализацию моделей и прогноз необходимо делать быстрее «реального времени» развития ситуаций. Инициализация осуществляется по фактической информации о текущем состоянии атмосферы. В реальных условиях, даже в нормальных ситуациях, не говоря уже об аварийных, получить набор данных измерений, достаточных для формирования трехмерных начальных полей функций состояния с требуемым моделью пространственным разрешением, практически невозможно. Просто нет таких технических возможностей.

В настоящей статье предлагается способ решения таких задач с минимальным набором данных наблюдений. В качестве базовой модели для прогнозирования полей метеоэлементов и концентраций за-

грязняющих примесей используется модель динамики и загрязнения атмосферы индустриальных регионов [1, 2].

### 2. Постановка задачи

Основные уравнения модели [2]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \Lambda(U) - IV = -\pi_s \left[ \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\sigma RT}{\Phi} \frac{\partial \pi_s}{\partial x} \right]; \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \Lambda(V) + IU = -\pi_s \left[ \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\sigma RT}{\Phi} \frac{\partial \pi_s}{\partial y} \right]; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} + \Lambda(\tilde{T}) - \frac{RT\tau}{c_p(\sigma + p_T/\pi_s)} = \frac{\pi_s Q_T}{c_p}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \pi_s}{\partial t} + \int_0^1 \left( \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) d\sigma = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \sigma} + \frac{\pi_s RT}{\Phi} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\pi_s c)}{\partial t} + \Lambda(\pi_s c) = Q_c. \quad (6)$$

Здесь

$$\sigma = (p - p_T)/\pi_s, \quad \pi_s = p_s - p_T; \quad \Phi = \sigma \pi_s + p_T,$$

где  $p$  – давление;  $p_T, p_s$  – давление на верхней границе воздушной массы и на поверхности Земли;  $u, v, \dot{\sigma}$  – компоненты вектора скорости  $\mathbf{u}$  в направлении координат  $x, y, \sigma$  соответственно;  $t$  – время;  $U = \pi_s u$ ;  $V = \pi_s v$ ;  $\tau = dp/dt$  – вертикальная скорость в изобарических координатах;  $H$  – геопотенциал;  $T$  – температура;

$T = \pi_s \tilde{T}$ ;  $c = \{c_i (i = \overline{1, k})\}$  – концентрации загрязняющих примесей;  $k$  – число различных веществ;  $Q_T, Q_c$  – источники тепла и примесей;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $c_p$  – удельная теплоем-

кость при постоянном давлении;  $l$  – параметр Кориолиса;  $\Lambda(\pi, \varphi)$  – адвективно-диффузионный оператор. В операторе переноса для уравнения (6) в вертикальной скорости учитывается дополнительно скорость гравитационного осаждения или подъема частиц примесей.

Задача решается в пространственно-временной области  $D_t$  с граничными условиями:  $\dot{\sigma} = 0$  при  $\sigma = 0,1$  и  $H = gh(x, y)$  при  $\sigma = 1$ , где  $g$  – ускорение свободного падения;  $h(x, y)$  – рельеф поверхности Земли. На боковых и верхней границах области  $D_t$  предполагается выход на фоновые значения соответствующих функций состояния. На нижней границе задаются условия на потоки момента количества движения, тепла и загрязняющих примесей в рамках параметризационной модели приземного слоя [1] с учетом стратификации атмосферы и суточного хода температуры подстилающей поверхности в зависимости от категорий землепользования.

### 3. Оценка фонового состояния атмосферы

Для описания полей метеозаэlements в рамках локальных и мезомасштабных моделей обычно используется принцип декомпозиции по масштабам процессов [1], в соответствии с которым функции состояния представляются в виде суммы  $\varphi = \Phi + \varphi'$ , где  $\Phi$  – фоновое значение функции состояния, которое считается заданным, а  $\varphi'$  – искомое отклонение от фонового состояния.

Предположим, что фоновые функции имеют характерные пространственно-временные масштабы больше соответствующих масштабов для функций-отклонений  $\varphi'$ . При таком подходе фоновые процессы можно рассматривать как квазистационарные, а зависимость от времени в их описании задавать параметрически. Такая декомпозиция в некоторой мере упрощает проблему с постановкой начальных условий и условий на верхней и боковых границах области, так как в этом случае ставятся условия для отклонений или для их производных, а в качестве начальных условий можно принять рассчитанные по текущей информации фоновые значения функций состояния.

Принимая предположения о квазистационарном характере фонового движения, для расчета составляющих вектора скорости фонового потока используем стационарную модель динамики атмосферы над неоднородной поверхностью Земли:

$$\mathbf{u} \operatorname{grad} u - l(v - v_g) - v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0; \quad (7)$$

$$\mathbf{u} \operatorname{grad} v + l(u - u_g) - v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 0; \quad (8)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + g\rho = 0, \quad p = \rho RT, \quad (10)$$

где  $u, v, w$  – составляющие вектора скорости ветра  $\mathbf{u}$  в системе координат  $(x, y, z)$ ;  $\rho$  – плотность;  $u_g, v_g$  – компоненты вектора скорости геострофического ветра. В приземном слое принимается соотношение

$$\frac{\partial}{\partial z} |u + iw| = \frac{u_*}{\kappa} \left( \frac{1}{z} + \frac{a}{L} \right), \quad (11)$$

где  $i$  – мнимая единица;  $u_*$  – скорость трения;  $\kappa$  – постоянная Кармана;  $a$  – эмпирическая константа;  $L$  – масштаб Монины–Обухова.

Граничные условия для замыкания модели (7)–(11):

$$u = v = w = 0 \quad \text{при } z = h(x, y)$$

$$u = u_g, v = v_g, p = p_\phi \quad \text{при } z = h_b;$$

$$u + iv = A\partial/\partial z(u + iv) \quad \text{при } z = h(x, y) + h_s,$$

где  $h_s$  – высота приземного слоя;  $h_b$  – верхняя граница, соответствующая  $p_T$ ;  $p_\phi$  – фоновое значение давления;  $A$  – постоянная величина. По горизонтальным переменным предполагаются достаточная гладкость и ограниченность всех функций.

При постоянных по пространству значениях параметров  $v$  и  $l$  решение уравнений (7)–(9), (11) с этими граничными условиями находится аналитически [3]. Таким образом, рассчитываются фоновые значения поля ветра  $\mathbf{u}$  в области  $D_t$  с учетом неоднородности рельефа. Здесь участвует ряд входных параметров  $\{u_g, v_g, v, a, L, h_s, h_b, h(x, y)\}$ .

Скорость геострофического ветра на высоте  $z = h_b$  задается по данным измерений. Она предполагается параметрически зависящей от времени. При относительно больших горизонтальных размерах области  $D_t$  скорость  $\{u_g, v_g\}$  может зависеть от  $(x, y)$ . В данном случае область по горизонтали разбивается на совокупность подобластей с кусочно-постоянными параметрами  $\{u_g, v_g, v\}$  и в каждой такой подобласти рассчитываются компоненты вектора скорости. При необходимости рассчитываются фоновые значения полей плотности и давления по данным наблюдений о давлении  $p_\phi$  на высоте  $h_b$  и данным о температуре с помощью уравнений (10).

В данной статье речь идет об использовании численных моделей для прогнозирования в реальном времени полей метеозаэlements и на их фоне процессов распространения примесей в атмосфере в аварийных ситуациях, связанных с выбросами токсичных загрязнений. В таких ситуациях необходимо срочно принимать решения по меньшей мере о разворачивании системы наблюдений за распространением загрязнителей

для оценки (в зависимости от состава выбросов) химической, бактериологической или радиологической обстановки с целью организации мероприятий по предупреждению возможных отрицательных последствий. Наличие прогноза позволит спланировать эти мероприятия.

Для определенности мы рассматриваем случай с относительно холодными выбросами, т.е. когда приращение температуры, средней по объему ячейки сеточной области и за интервал времени  $\Delta t$  дискретизации модели, составляет величину порядка 1–5 К. Это ограничение рассматриваемой здесь базовой модели (1)–(6). При более высоких темпах аварийного разогрева атмосферы необходимо использовать модели в негидростатическом приближении [1].

Модель (7)–(11) функционально полна и по физическому содержанию согласуется с базовой моделью. Поэтому полученное с ее помощью фоновое состояние дает хорошие стартовые условия для базовой модели и без шоковых эффектов, обычно возникающих при инициализации моделей по неполным данным наблюдений из-за несогласованности характерных масштабов и ошибок моделей и реальных полей. А процедуры согласования весьма трудоемки и требуют больших затрат времени при реализации их на ЭВМ.

#### 4. Примеры типичных ситуаций

Приведем примеры расчета ситуаций, которые обычно реализуются в промышленных регионах со специфическими режимами распространения и накопления примесей, обусловленных конкретными особенностями территорий и расположенных на них объектов как источников загрязнений. Эти ситуации становятся экстремальными, если примеси «вдруг» окажутся высокотоксичными.

*Эксперимент 1.* Цель эксперимента – оценить влияние изменений температуры поверхности Земли в режиме суточного хода и скорости фонового ветра на характер локальной циркуляции и распространения примесей в атмосфере на примере Новосибирского региона. В качестве источников загрязнения выступает совокупность стационарных источников, локализованных в г. Бердске, примыкающем к Новосибирскому водохранилищу и расположенном на расстоянии 40 км к югу от центра Новосибирска и в 15 км к югу от Академгородка (ННЦ).

Рассматриваются два сценария, отличающиеся величиной скорости фонового потока: сценарий А – 5 м/с и сценарий В – 7 м/с. В обоих вариантах поток юго-западный, сезон летний. Инициализация модели осуществлялась по описанному выше способу. На рис. 1 представлены двумерные разрезы рассчитанных полей концентраций примесей на высоте 50 м над рельефом, для 9 и 21 ч местного времени.

В обоих сценариях в ночное время распространение примесей происходит в основном в нижних

слоях атмосферы, что обуславливается устанавливающейся в это время инверсией вследствие остывания подстилающей поверхности. Ночью температура водохранилища выше температуры окружающей суши. В окрестности источника направление бризового ветра совпадает с фоновым. Поэтому направления движения примеси в сценариях А и В близки (рис. 1, а, в).

Существенным в этом случае является тот факт, что при слабом фоновом ветре (рис. 1, а) и, следовательно, плохой проветриваемости концентрация примеси в окрестности источника значительно выше, чем при более сильном (рис. 1, в). Как видно на рис. 1, а, в сценарии А на северо-восточной окраине Академгородка формируется локальный максимум концентрации. В сценарии В этот эффект не так ярко выражен и локальный максимум смещен к северу от ННЦ.

В дневное время примесь распространяется как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Направление бризового ветра противоположно фоновому ветру. В сценарии А скорость фонового ветра мала и распространения примеси на противоположный от источника берег Бердского залива практически не происходит (рис. 1, б). В сценарии В фоновый поток уже может преодолеть массу холодного воздуха над заливом и примесь попадает на территорию Академгородка. Поскольку последний и в ночное, и в дневное время выступает островом тепла, на его подветренной окраине возникает плохо проветриваемая зона, где примесь накапливается.

Эти сценарии показывают, что даже в относительно комфортных условиях с умеренной фоновой проветриваемостью атмосферы из-за локальных особенностей рельефа и температурных контрастов типа «вода – суша – город» проявляются зоны накопления загрязнения, что приводит к экологически неблагоприятным ситуациям. Мы специально здесь рассматриваем только удаленные источники, чтобы продемонстрировать характерные масштабы процессов загрязнения. Локальные источники существенно усиливают картину загрязнений, особенно в нижних слоях атмосферы. Следует заметить, что санитарные зоны обычно принимаются шириной 0,2–1,5 км возле источников.

*Эксперимент 2.* Цель этого эксперимента состояла в воспроизведении ситуаций, связанных с формированием мезомасштабной атмосферной циркуляции в Томском регионе, и распространением примесей при аварийном выбросе радионуклидов на радиохимическом заводе в Северске. Входные данные для расчетов задавались по доступной фактической информации за 6–13 апреля 1993 г.

Фоновый поток – юго-западный со скоростью 7 м/с на уровне 700 мбар. Поле ветра формируется в результате взаимодействия фонового потока с орographicкими и термическими неоднородностями подстилающей поверхности, его фрагмент представлен на рис. 2, а.

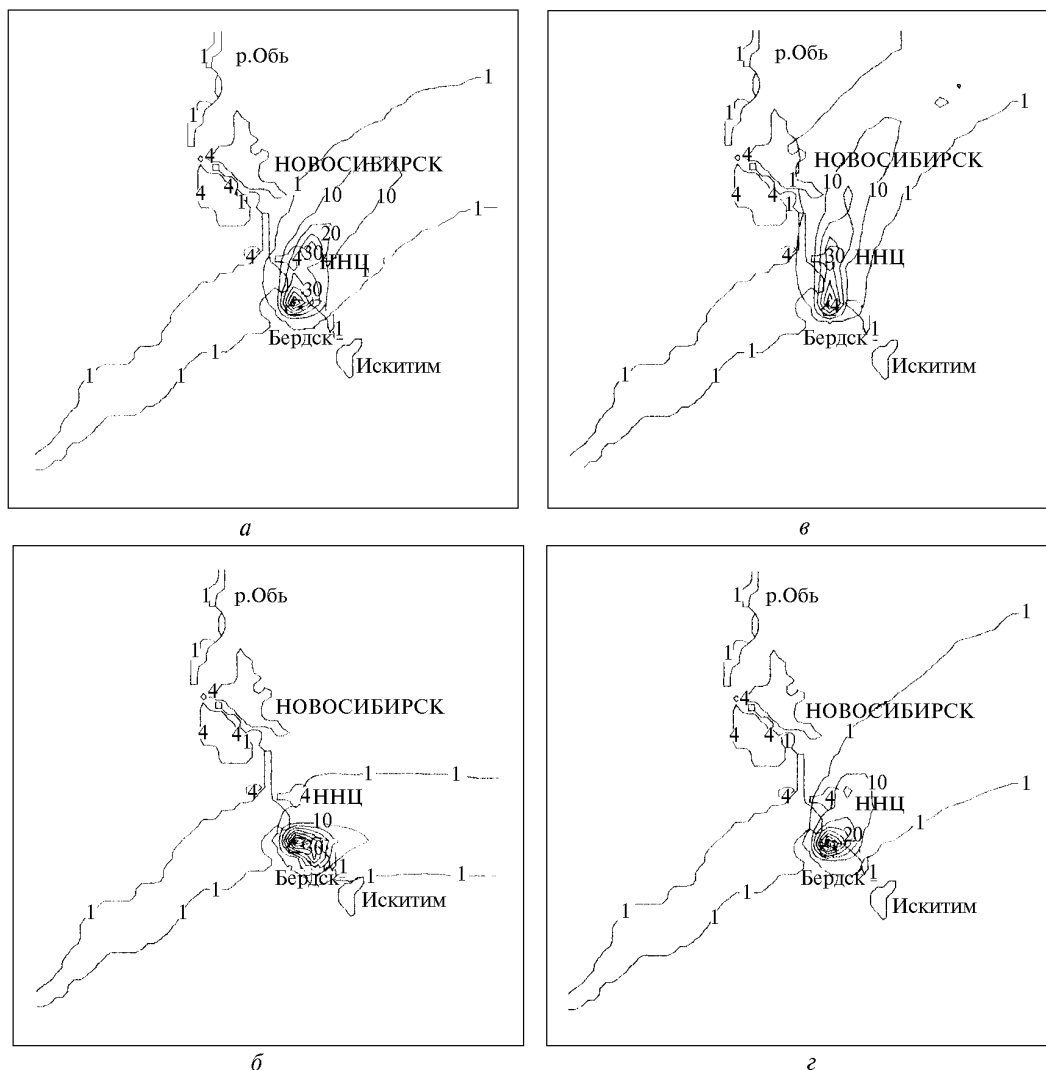


Рис. 1. Суточный ход полей концентрации примесей в атмосфере г. Новосибирска от источников в г. Бердске (летний сезон, фоновый поток юго-западный, двумерные разрезы на высоте 50 м над рельефом, время местное): а – 9.00, б – 21.00 при фоновом ветре 5 м/с; в – 9.00, г – 21.00 при фоновом ветре 7 м/с

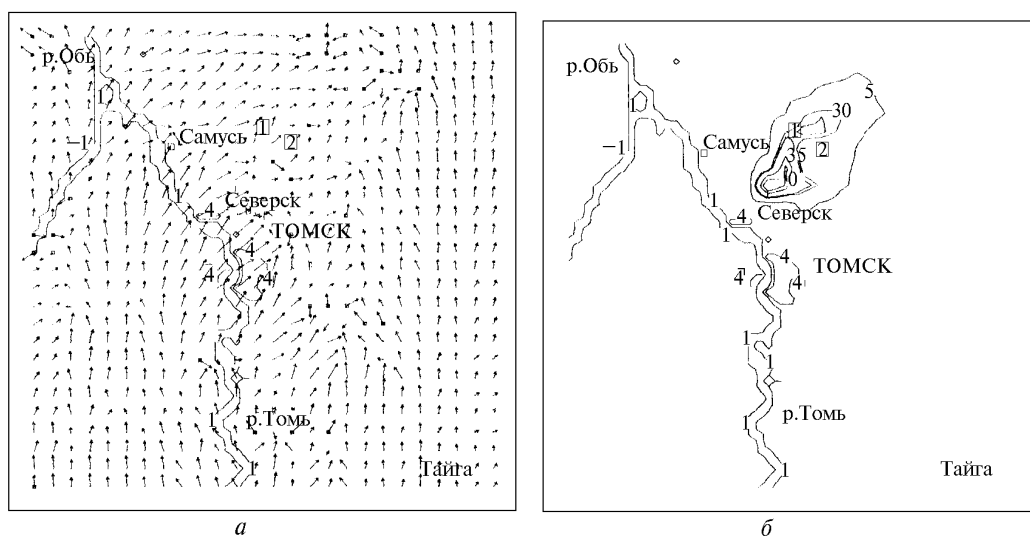


Рис. 2. Численный эксперимент по моделированию распространения примесей от точечного источника (радиохимический завод в Северске, 1 – Георгиевка, 2 – Наумовка): а – горизонтальная структура атмосферной циркуляции на высоте 50 м от рельефа, фоновый поток юго-западный, 7 м/с; б – поле концентрации примесей

Распространение примеси происходит таким образом, что в зону повышенного загрязнения попадает населенный пункт Георгиевка, к северо-востоку от которого формируется локальный максимум концентраций (рис. 2, б). В то же время Наумовка, которая расположена на траектории фонового ветра, оказывается вне зоны наибольшего загрязнения. Результаты моделирования сопоставлялись с результатами измерений радиоактивного загрязнения местности, представленными в [4]. На рис. 2, б показан двумерный разрез рассчитанного поля, соответствующий схеме зоны повышенного загрязнения территории радионуклидами, построенной в [4] по данным измерений. Отметим, что рассчитанные нами поля концентраций согласуются по конфигурации и интенсивности зоны повышенного загрязнения со схемой, приведенной в [4]. Такое согласие свидетельствует о хороших потенциальных возможностях модели по воспроизведению и прогнозированию реальных ситуаций и представленного в статье способа оперативной инициализации моделей по ограниченному набору фактических данных.

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

## Заключение

Представленный здесь комплекс моделей, дополненный процедурой инициализации, обладает высокой эффективностью и мобилизационной готовностью к использованию для расчета экстремальных ситуаций, поскольку требует минимального объема фактической информации о фоновых атмосферных процессах. Следует заметить, что для успешности оценок экстремальных ситуаций необходимо обратить внимание на получение достоверной информации о параметрах выбросов загрязнений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант N 97-05-96511) и Интеграционного гранта ИГ СО РАН-97 N 30.

1. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
2. Пененко В.В., Коротков М.Г. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. N 6. С. 590–597.
3. Као С.К. // J. Appl. Meteor. 1981. V. 20. N 4. P. 386–390.
4. Израэль Ю.А. и др. Метеорология и гидрология. 1993. N 6. С. 5–8.

Поступила в редакцию  
12 февраля 1998 г.

*V.V. Penenko, M.G. Korotkov.* **Application of Numerical Models to Prediction of Emergency or Ecologically Unfavourable Situations in the Atmosphere.**

The problems of organization of numerical models of atmospheric hydrothermodynamics and pollutants transfer and their application to study and prediction of such situations in the climatic system of cities and industrial regions, which are ecologically unfavourable or abnormal relative to transfer and accumulation in the atmosphere of contaminants from anthropogenic and natural sources are discussed.