

В.В. Пененко, М.Г. Коротков

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЗОКЛИМАТОВ И ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ
ИНДУСТРИАЛЬНЫХ РЕГИОНОВ (НА ПРИМЕРЕ г. ТОМСКА)**

Представлены математические модели гидротермодинамики атмосферы и переноса загрязняющих примесей в атмосфере промышленных регионов. Даны примеры моделирования мезоклиматов и распространения загрязняющих примесей для типичных ситуаций Томского промышленного региона.

Необходимость исследования изменений гидротермодинамических процессов, а также потребности в оценке экологической перспективы промышленных районов приводят к созданию математических моделей, описывающих эти процессы [1, 2]. Распространение загрязняющих примесей в атмосфере большого города и в общем случае промышленного региона происходит на фоне атмосферной циркуляции, возникающей под совместным влиянием естественных и антропогенных факторов. Формирование циркуляции воздушных масс осуществляется при взаимодействии крупномасштабных атмосферных движений с локальными неоднородностями подстилающей поверхности, обусловленными влиянием более теплого (по сравнению с окружающей территорией) города, разности температур поверхности водоемов и суши, а также температурными контрастами различных участков подстилающей поверхности. При моделировании процессов такого масштаба необходимо учитывать факторы, обусловленные деятельностью человека: искусственные источники тепла, влаги, загрязняющих примесей и изменения характеристик поверхности Земли на больших площадях.

Для учета влияния подстилающей поверхности и более точного описания воздушных течений в приземном слое в рамках предлагаемых к рассмотрению моделей вводятся соответствующие параметризации, а для описания неоднородностей самой поверхности используются понятия категорий землепользования. Для каждой категории задаются индивидуальные оценки параметров поверхности Земли как в естественной форме, так и с учетом их антропогенных изменений.

2. Основная система уравнений

Численная модель базируется на системах уравнений гидротермодинамики и переноса примесей в атмосфере. Рассмотрим систему полных уравнений гидротермодинамики атмосферы в квазистатическом приближении над неоднородной поверхностью Земли. Для удобства учета рельефа поверхности в модели используется вертикальная координата, следящая за рельефом:

$$\sigma = (p - p_T)/\pi_s, \quad \pi_s \equiv p_s - p_T, \quad (1)$$

где p – давление; p_T и p_s – давление на верхней границе воздушной массы и на поверхности Земли. Координаты x и y направлены на восток и север соответственно.

Выпишем основные уравнения модели [2, 3].

Уравнения движения:

$$\frac{\partial \pi_s u}{\partial t} + \tilde{E}(\pi_s, u) - l \pi_s v = -\pi_s \left[\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\sigma RT}{\Phi} \frac{\partial \pi_s}{\partial x} \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial \pi_s v}{\partial t} + \tilde{E}(\pi_s, v) + l \pi_s u = -\pi_s \left[\frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\sigma RT}{\Phi} \frac{\partial \pi_s}{\partial y} \right], \quad (3)$$

где $\Phi \equiv \sigma \pi_s + p_T$.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \pi_s}{\partial t} + \mathcal{L}(\pi_s) = 0. \quad (4)$$

Здесь приняты обозначения:

$$\mathcal{L}(\pi_s, \varphi) = \frac{\partial \pi_s \varphi u}{\partial x} + \frac{\partial \pi_s \varphi v}{\partial y} + \frac{\partial \pi_s \dot{\sigma} \varphi}{\partial \sigma} \quad (5)$$

– оператор переноса в σ -системе координат в дивергентной форме;

$$\tilde{\mathcal{L}}(\pi_s, \varphi) = \mathcal{L}(\pi_s, \varphi) + F_\varphi^H + F_\varphi^B, \quad (6)$$

где F_φ^H, F_φ^B – операторы турбулентного обмена субстанции φ в горизонтальном и вертикальном направлениях; $\mathbf{u} = (u, v, \dot{\sigma})$ – вектор скорости ветра; $u, v, \dot{\sigma}$ – компоненты вектора скорости в направлении координат x, y, σ , соответственно $\dot{\sigma} \equiv \frac{ds}{dt}$. Уравнение для тенденции давления $\pi_s \equiv p_s - p_T$:

$$\frac{\partial \pi_s}{\partial t} + \int_0^1 \left[\frac{\partial \pi_s u}{\partial x} + \frac{\partial \pi_s v}{\partial y} \right] d\sigma = 0. \quad (7)$$

Это уравнение получается интегрированием по вертикальной координате уравнения неразрывности (4) при условиях $\dot{\sigma} = 0$ при $\sigma = 0$ ($p = p_T$) и $\sigma = 1$ ($p = p_s$).

Уравнение для вертикальной скорости в σ -системе координат

$$\dot{\sigma} = -\frac{1}{\pi_s} \int_0^\sigma \left[\frac{\partial \pi_s}{\partial t} + \frac{\partial \pi_s u}{\partial x} + \frac{\partial \pi_s v}{\partial y} \right] d\sigma, \quad (8)$$

а величина $\frac{\partial \pi_s}{\partial t}$ исключается с помощью уравнения (7).

Уравнение притока тепла:

$$\frac{\partial \pi_s T}{\partial t} + \tilde{\mathcal{L}}(\pi_s T) - \frac{RT\tau}{c_p (\sigma + p_T/\pi_s)} = \frac{\pi_s Q}{c_p}, \quad (9)$$

$$\tau = \frac{dp}{dt}; \quad \tau = \pi_s \dot{\sigma} + \sigma \frac{d\pi_s}{dt}; \quad \frac{d\pi_s}{dt} = \frac{\partial \pi_s}{\partial t} + u \frac{\partial \pi_s}{\partial x} + v \frac{\partial \pi_s}{\partial y}, \quad (10)$$

где T – температура; c_p – удельная теплоемкость сухого воздуха при постоянном давлении; Q – источники тепла.

Уравнение гидростатики:

$$\frac{\partial H}{\partial \sigma} = -\frac{\pi_s R}{\Phi} T. \quad (11)$$

Уравнения переноса примесей:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \tilde{\mathcal{L}}(\varphi) = f, \quad (12)$$

где f – функция, описывающая источники примеси; φ – концентрация примесей. В общем случае примеси в атмосфере представляют собой многокомпонентные смеси. Число компонент задается как входной параметр модели.

Скорости гравитационного осаждения примесей учитываются прибавлением соответствующих значений к вертикальной компоненте скорости.

Для замыкания математической модели необходимо задание начальных и краевых условий. На нижней границе условия задаются с использованием параметризованных моделей приземного и пограничного слоев атмосферы; на верхней границе воздушной массы и на боковых границах – условия выхода на «фоновые» процессы [2].

Дискретные аппроксимации базируются на вариационном принципе в сочетании с методом расщепления [3]. Следуя идеям метода расщепления по физическим процессам [4], выделим два этапа: 1) перенос с турбулентным обменом, 2) динамическое согласование полей метеоэлементов. На этапе переноса для аппроксимации адвективно-диффузионных операторов типа (6) используются монотонные численные схемы [5–7].

Опыт практического применения метода расщепления для решения задач геофизической гидротермодинамики показывает, что задача динамического согласования полей является наиболее сложным и трудоемким в реализации этапом расщепления. Соотношение пространственно-временных масштабов моделируемых явлений на этапе согласования такое, что для их правильного воспроизведения необходимо использовать неявные или явно-неявные схемы. Это обусловлено тем обстоятельством, что оператор согласования градиента давления и поля ветра по пространственным переменным без учета турбулентного обмена является антисимметричным, а двухслойные явные схемы для задач с антисимметричным «пространственным» оператором неустойчивы по времени.

Для решения задачи на этапе согласования используется явно-неявный прямой алгоритм, позволяющий при выполнении условий аппроксимации обеспечить энергетическую сбалансированность и, как следствие, устойчивость вычислений независимо от температурной стратификации атмосферы [8].

3. Сценарии моделирования мезоклиматов и качества атмосферы

При моделировании атмосферных процессов мезорегиональных масштабов необходимо знать значение функции состояния в начальный момент времени. Кроме того, требуется непрерывная информация о «фоновом» состоянии атмосферы, т.е. данные о крупномасштабных процессах. Без этой информации проблематично задание правильных условий на боковых границах области. На практике же начальные данные и данные о фоновых процессах либо отсутствуют, либо недостаточно регулярны в пространстве и времени. Поэтому инициализация моделей и их замыкание на ограниченных территориях краевыми условиями представляют серьезную проблему при решении задач в оперативных режимах реального времени. Наша главная цель состоит в изучении условий формирования мезоклиматов, и в данном случае удобно работать в рамках сценарного подхода. Этот подход предполагает формирование набора сценариев циркуляции атмосферы, при этом естественно, что особый интерес представляют моделирование сценариев, соответствующих наиболее часто повторяющимся метеоситуациям, и оценка на их основе антропогенных нагрузок для рассматриваемых объектов, выявление участков территории, наиболее неблагоприятных с экологической точки зрения для размещения новых промышленных объектов, представляющих собой источники загрязняющих примесей.

Для оценок интенсивности и конфигурации областей влияния антропогенных источников использованы функции чувствительности функционалов, определяющих средние значения концентраций загрязняющих примесей в заданных подобластях региона за определенные интервалы времени.

Подробное описание комплекса моделей, информационно-моделирующей системы и примеры выполненных на их основе прогнозно-экспертных сценариев даны в работах [9, 10]. Их анализ показывает, что оценки качества атмосферы и экологической перспективы промышленных центров необходимо осуществлять с учетом того факта, что город является частью климатической системы промышленного региона в целом. В результате взаимодействия локальной структуры городских островов тепла, неоднородностей подстилающей поверхности окружающей территории с набегающими воздушными потоками создается сложная система атмосферной циркуляции с восходящими потоками воздуха над более нагретыми участками подстилающей поверхности и, что характерно, с возвратными течениями, противоположными набегающим потокам. Поэтому оценки экологических ситуаций и планирование природо-

охранных мероприятий в окрестностях «островов тепла» с применением методик, базирующихся на использовании «розы ветров», будут неадекватными фактическому состоянию.

Для исследования особенностей формирования мезоклиматов Томского региона и более детального моделирования структуры атмосферной циркуляции в окрестностях города определены границы так называемых Томского промышленного региона и Томского района. Достаточная однородность подстилающей поверхности на больших площадях и значительная удаленность друг от друга крупных промышленных центров на территории Сибири позволяют сделать предположение об определяющем влиянии на формирование атмосферной циркуляции и качество воздуха сибирских промышленных регионов локальных факторов как естественного, так и антропогенного происхождения. Это позволяет значительно сократить пространственные размеры области моделирования. В дальнейшем изложении под Томским промышленным регионом будет подразумеваться область 100×100 км, а под Томским промышленным районом – область 50×50 км. Центры этих двух областей совпадают с центром г. Томска. Высота свободной верхней границы воздушной массы совпадает с изобарической поверхностью 700 Мбар. Первый расчетный уровень совпадает с высотой свободной верхней границы воздушной массы. В расчетах высота приземного слоя полагалась равной 50 м над уровнем рельефа подстилающей поверхности. Характеристики поверхности задаются параметрически выделением следующих категорий землепользования: водная поверхность, хвойный лес, лиственный лес, смешанный лес, городская застройка, застройка сельского типа, поле, болота.

Для проведения сценарных расчетов собран банк данных по региону, содержащий информацию, необходимую для задания входных параметров моделей, составлены карты-схемы категорий землепользования, массивы значений высоты рельефа над уровнем моря с различной степенью дискретизации.

На рис. 1 представлена карта-схема Томского промышленного региона, на которой выделены только две из восьми категорий землепользования (вода и городская застройка), обозначены границы Томского района и населенные пункты городского типа.

Проведена серия сценарных расчетов по моделированию метеоситуаций, наиболее характерных для летнего периода. На их основе проведена оценка антропогенных нагрузок от имеющихся и предполагаемых источников загрязнения, в рамках конкретных сценариев выявлены участки территории, наиболее неблагоприятные для размещения промышленных объектов, представляющих собой как действующие, так и потенциальные источники загрязняющих примесей.

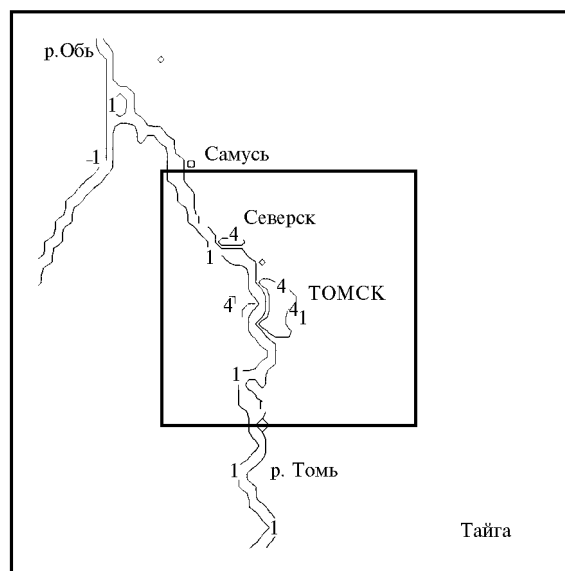


Рис. 1. Томский промышленный регион. Область 100×100 км. 1 – граница водоемов; 4 – граница городских районов

В качестве примера приведены результаты моделирования сценария, соответствующего дневному периоду летнего сезона при западном фоновом ветре, скорость которого полагалась

равной 5 м/с. Такие направление и скорость фонового потока типичны для этого сезона. Кроме того, сценарий интересен тем, что набегающий поток воздуха испытывает значительное влияние, обусловленное неоднородностью подстилающей поверхности.

На рис. 2 представлена структура атмосферной циркуляции в Томском промышленном районе на высоте 50 м над поверхностью. Длина стрелок на рисунке пропорциональна значениям скорости ветра в узлах сетки. Квадратиками отмечены те узлы, в которых величина скорости на порядок меньше максимального в области значения.

Характер движения воздушных масс в центральной части области определяется, главным образом, взаимодействием городского острова тепла с набегающим фоновым потоком. Векторное поле под влиянием реки и города деформируется по направлению и интенсивности. За городом образуется вихревая ячейка с относительно слабым противотоком. В нижних слоях над городской застройкой ветер усиливается за счет бризового эффекта, обусловленного влиянием температурных контрастов между р. Томь, припойменными территориями и городом. Это способствует проветриванию города с наветренной стороны. А за городом в области противотоков создаются условия, благоприятствующие накоплению примесей, сносимых из городских массивов и других территорий, попадающих в зону формирования вихревого потока. В целом в подветренной части области движение воздушных масс замедляется и образуются циркуляционные ячейки.

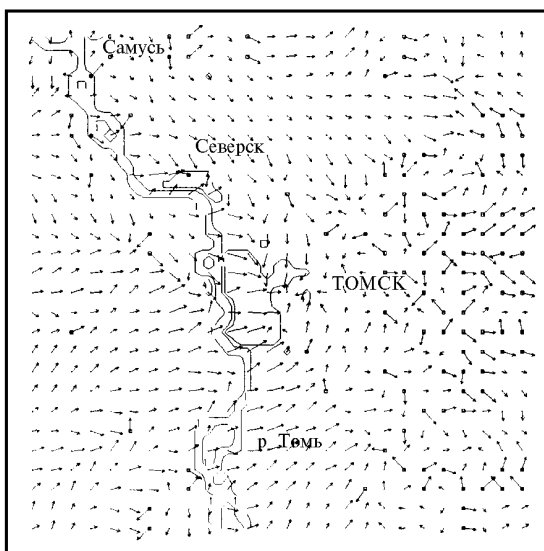


Рис. 2. Томский промышленный район. Структура атмосферной циркуляции. Горизонтальный разрез, 50 м над поверхностью

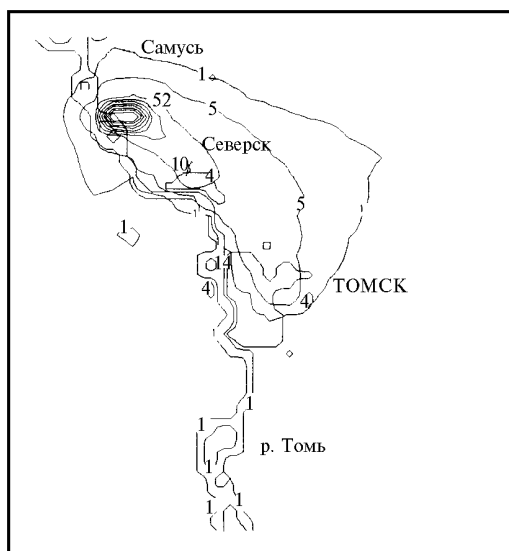


Рис. 3. Томский промышленный район. Поле концентрации примеси. Горизонтальный разрез, 50 м над поверхностью

На рис. 3 представлено поле концентрации примеси на высоте 50 м от поверхности от стационарного точечного источника единичной мощности, расположенного на расстоянии 25 км к северо-западу от Томска. Крайняя изолиния соответствует 0,1 % от максимальной концентрации в области, последующие – соответственно 1, 10, 20, 30 % и т.д. Видно, что облако примеси распространяется на фоне локальной циркуляции воздуха и захватывает городские застройки гг. Северска и Томска. С позиций экологической безопасности эта ситуация интересна тем, что здесь проявляется действие механизма вовлечения загрязняющих примесей в зону, находящуюся под влиянием острова тепла, хотя непосредственно западный фоновый поток должен был бы снести примеси в сторону от этих городов.

На рис. 4 представлена функция влияния источников загрязняющих примесей на качество атмосферы в населенных пунктах.

Оцениваемый функционал представляет собой величину концентрации примесей, усредненную по времени и по части области, занятой населенными пунктами, с весом, условно учитывающим различия в плотности населения. Так, например, вес измерений концентраций в каждой точке области для городских территорий принимается в два раза большим, чем для населенных пунктов сельского типа. Выбор весовой функции и меры для вычисления функционала производится в соответствии с целями исследования. В данном случае эксперимент методический, и функционал со-

ставлен по принципу суперпозиции «охраняемых зон». Поэтому функция влияния также представляет собой суперпозицию функций влияния для отдельных зон. В информационном плане функция влияния характеризует относительный вклад источников в оцениваемый функционал; отсюда следует, что чем больше ее значение в точке, тем больше вклад расположенного в этой точке источника примеси в оцениваемый функционал. Расположение источников загрязнений в окрестностях максимумов наиболее неблагоприятно с экологической точки зрения.

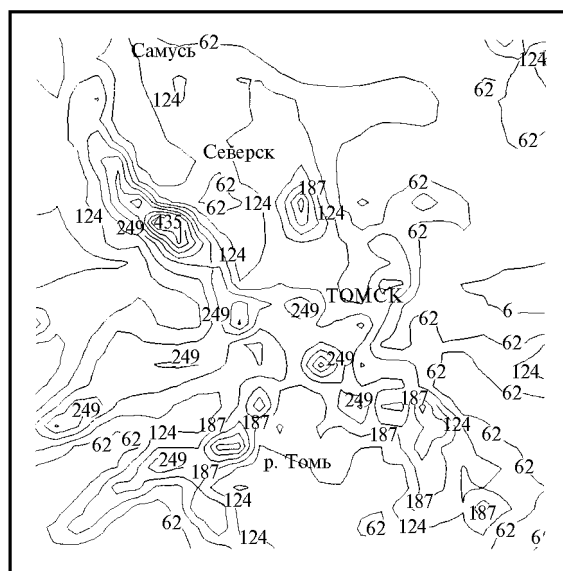


Рис. 4. Томский промышленный район. Функция влияния для населенных пунктов района. Горизонтальный разрез, 50 м над поверхностью

4. Заключение

Анализ результатов сценариев моделирования еще раз подтверждает наш тезис о том, что для экологического планирования и прогнозирования недостаточно ориентироваться на упрощенные «инженерные» методики, обычно используемые в практике для решения природоохранных задач. Необходимо детально учитывать специфику конкретных регионов и их потенциальные возможности в образовании экологически неблагоприятных ситуаций.

Опыт показывает, что социально приемлемые оценки экологической перспективы можно получать только с помощью достаточно полных, по физическому содержанию, математических моделей, учитывающих взаимосвязи между гидротермодинамическими, химическими и биосферными процессами в климатической системе городов и промышленных регионов при различных вариантах антропогенных нагрузок. Одна из базовых версий моделей этого класса представлена в настоящей статье. При таком подходе к проблеме природоохранного прогнозирования будут исключаться вопросы о «неожиданных» проявлениях экологических катастроф.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант N 94-05-16105.

1. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 319 с.
2. Пененко В. В., Алоян А. Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 252 с.
3. Пененко В. В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 351 с.
4. Марчук Г. И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 303 с.
5. Роч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 616 с.
6. Пененко В. В. Численные схемы для адвективно-диффузионных уравнений с использованием локальных сопряженных задач. Новосибирск, 1993. 49 с. (Препринт / РАН Сиб. отд-ние, ВЦ, 984).
7. Bott A. A. // Mon. Wea. Rev. 1989. V. 117. P. 1006–1015.
8. Пененко В. В. Явно-неявный метод решения задач динамического согласования полей метеоэлементов. Новосибирск, 1994. 25 с. (Препринт / ВЦ СО РАН, N 1037).
9. Пененко В. В., Коротков М. Г. // Математические проблемы экологии. ИМ СО РАН. Новосибирск, 1994. С. 81–86.

10. Пененко В.В. Разработка комплекса моделей и информационно-моделирующей системы для решения атмосферно-охранных задач для промышленного района и Академгородка // Окружающая среда и экологическая обстановка в Новосибирском научном центре. Новосибирск: Изд. СО РАН, 1995. С. 65–72.

ВЦ СО РАН,
Новосибирск

Поступила в редакцию
22 января 1997 г.

V. V. Penenko, M. G. Korotkov. **Modeling of Mesoclimates and Atmospheric Pollution of Industrial Regions (City Tomsk as an Example).**

Mathematical models of hydrothermodynamics and transport of pollutants in the atmosphere of industrial regions are presented. The examples of mesoclimate and spreading of pollutants for the typical situations in Tomsk industrial region are given.