

М.Г. Коротков

Формирование циркуляции атмосферы города при малых скоростях фонового потока

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

Поступила в редакцию 6.02.2002 г.

Обсуждаются особенности формирования атмосферной циркуляции над городом в случае малых скоростей фонового воздушного потока. Приводятся результаты численных экспериментов по моделированию сценария суточного хода циркуляции атмосферы г. Томска в зимний период.

Формирование циркуляции атмосферы города и в целом промышленного региона происходит в результате взаимодействия крупномасштабного фонового потока воздушной массы с локальными неоднородностями подстилающей поверхности. Орографические, динамические и термические неоднородности различных участков территории обуславливают характер возникающей циркуляции. При этом город, как правило, выступает в качестве мощного острова тепла. В случае наличия в области достаточно крупного водного объекта, последний, в зависимости от сезона и времени суток, может выступать как островом тепла, так и островом холода.

Проводимые исследования показывают, что существуют, так называемые, критические скорости фонового воздушного потока, начиная с которых с ростом скорости влияние подстилающей поверхности на характер движения резко уменьшается. При скоростях, близких к критическим, фоновый поток взаимодействует с крупными островами тепла и холода, и получаемая картина в основном аналогична для разных городов. В настоящей статье рассматриваются ситуации, когда скорости фонового потока малы и циркуляция определяется в основном свойствами подстилающей поверхности. В этом случае на характер движения влияют и те факторы, действие которых оказывается несущественным при больших скоростях. В результате формируются циркуляции, присущие конкретному городу и нетипичные для других. Возникающие особенности обусловлены, в частности, геометрией городской застройки, наличием пригорода с сельской застройкой, водными объектами, наличием и типом окружающих лесов и сельскохозяйственных угодий и т.п. Случай, когда скорость фонового потока мала, достаточно часто встречаются на территории Сибири, что является одним из аргументов в пользу практической значимости проводимых исследований.

Численная модель включает в себя уравнения гидротермодинамики и переноса примесей в атмосфере. Рассмотрим систему полных уравнений гидротермодинамики атмосферы в квазистатическом прибли-

жении 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 [1 – 3].

Уравнения движения:

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

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

где $\Phi \equiv \sigma \pi_S + p_T$.

Уравнение неразрывности:

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

Здесь приняты обозначения:

$$L(\pi_S \Phi) = \frac{\partial \pi_S \Phi u}{\partial x} + \frac{\partial \pi_S \Phi v}{\partial y} + \frac{\partial \pi_S \Phi \dot{\sigma}}{\partial x} \quad (5)$$

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

$$\tilde{L}(\pi_S \Phi) = L(\pi_S \Phi) + F_\Phi^H + F_\Phi^B, \quad (6)$$

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, $\dot{\sigma} \equiv \frac{d\sigma}{dt}$; l – параметр Кориолиса; H – геопотенциал.

Уравнение для тенденции давления

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

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

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

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

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

Уравнение гидростатики:

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

Уравнение переноса примесей

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

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. Скорость гравитационного осаждения примеси учитывается прибавлением соответствующего значения 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. Дискретные аппроксимации

базируются на вариационном принципе в сочетании с методом расщепления [4, 5]. На этапе переноса для аппроксимации уравнений в модели используются монотонные численные схемы [6, 7].

В рассматриваемых численных экспериментах объектом исследования выступал Томский промышленный регион. Задача решалась в области 100×100 км по горизонтали, центр области совпадает с г. Томском. Верхняя граница воздушной массы совпадает с 700 Мбар изобарической поверхностью. Шаги сетки по горизонтальным переменным равны 1 км, по вертикали рассматривается 10 уровней.

По инициативе ИОА СО РАН смоделирован сценарий суточного хода атмосферной циркуляции в области. В качестве входной информации использовались метеорологические данные на 10–11 февраля 2001 г., предоставленные сотрудниками ИОА. В рассматриваемый период в области наблюдался слабый (до 5 м/с) фоновый поток воздушной массы. Амплитуда суточного хода приземной температуры воздуха составляла $10\text{--}12^\circ$ в зависимости от места наблюдения.

Минимальная ночная и максимальная дневная температуры равнялись соответственно $-25 - 27$ и $-13 - 15^\circ$. Результаты моделирования приведены с интервалом 6 ч. На рис. 1 представлена горизонтальная структура атмосферной циркуляции на высоте 50 м над подстилающей поверхностью в окрестности Томска (25×25 км). Схематически обозначены р. Тоь и границы городской застройки. Квадратиками отмечены узлы сетки с малыми (по сравнению с максимальной) скоростями ветра. Средняя скорость ветра в окрестности Томска на данной высоте в течение суток равнялась $1\text{--}3$ м/с. На рис. 2 показано направление вертикальных воздушных потоков на высоте 100 м. Вертикальные штрихи отмечают направление вверх, горизонтальные – вниз.

Как видно из рисунков, структура поля ветра формируется в результате взаимодействия достаточно слабого фонового воздушного потока с городским островом тепла. Существенное влияние оказывают температурные контрасты участков подстилающей поверхности в зависимости от категории землепользования. Характер движения изменяется в течение суток. В качестве примера обратим внимание на участок территории, находящийся между центральной частью Томска и расположенным к востоку от города Академгородком. В течение суток здесь просматриваются нисходящие воздушные потоки и малые скорости ветра. При наличии источников примеси это может способствовать ее накоплению, формированию высокой концентрации [8].

Исходя из анализа полученных результатов, можно предположить, что накопленная примесь распространяется против фонового потока, который преобладает в области моделирования, в результате этого в районе Академгородка в течение суток эпизодически могут наблюдаться повышенные концентрации примеси. Спады концентрации могут быть обусловлены тем, что в определенные моменты улучшается «проветриваемость» Академгородка.

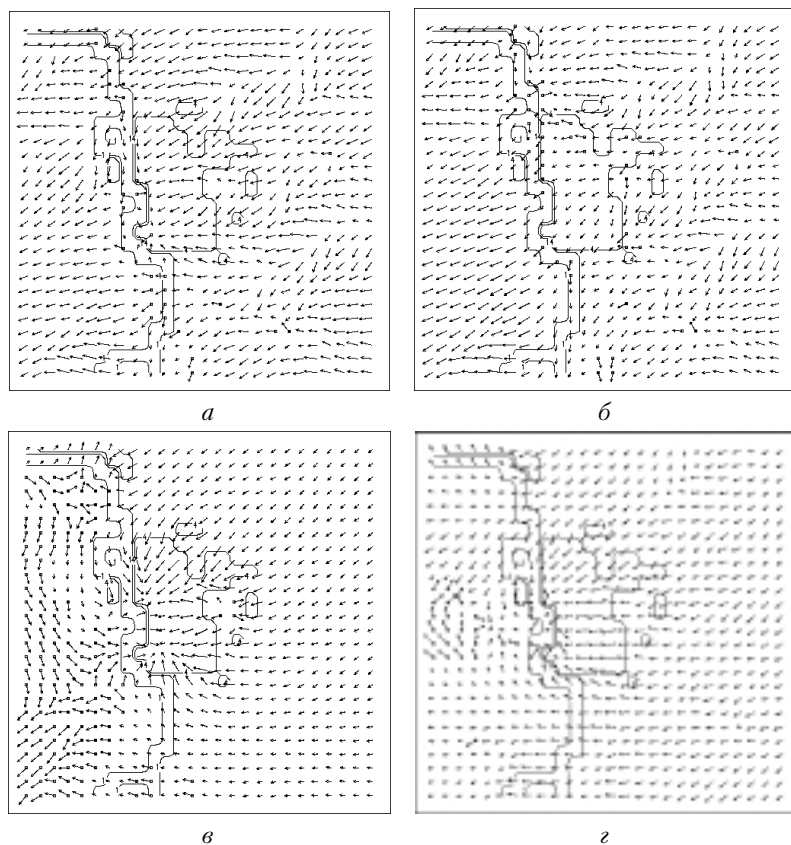


Рис. 1. Горизонтальная структура атмосферной циркуляции: *a* – 03.00; *б* – 09.00; *в* – 15.00; *г* – 21.00 местного времени

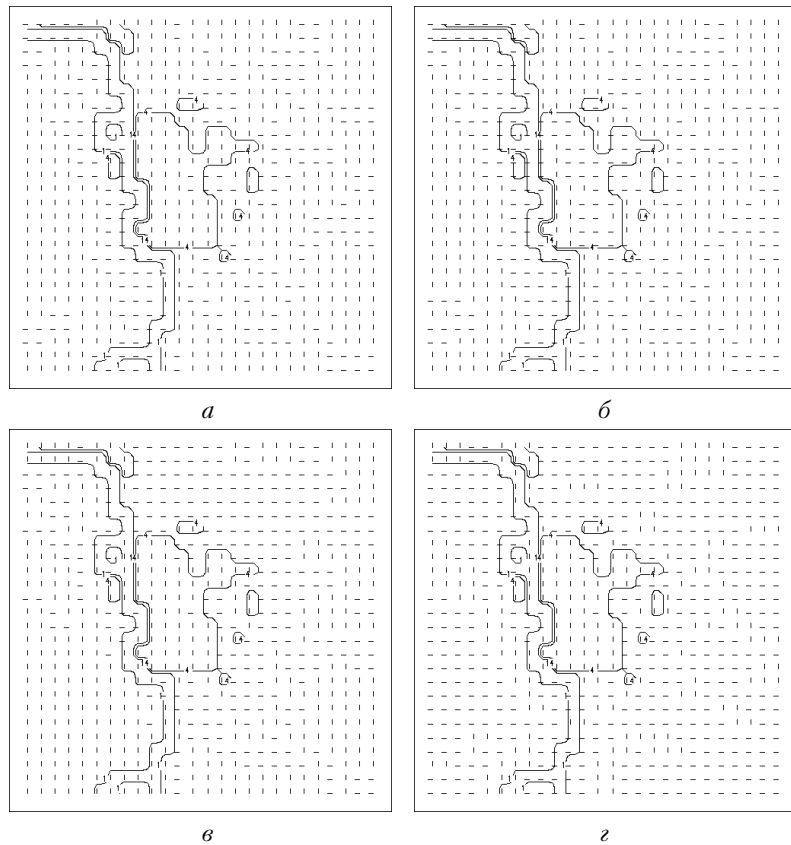


Рис. 2. Направление вертикальных воздушных потоков: *a* – 03.00; *б* – 09.00; *в* – 15.00; *г* – 21.00 местного времени

Работа поддержана РФФИ (гранты № 00-15-98543 и 01-05-65313), Минпромнауки и технологий РФ (проект 0201.06.269/349), Европейской комиссией (проект ICA2-СТ-2000-10024) и ИГ СО РАН № 64.

1. *Пененко В.В., Алоян А.Е.* Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 252 с.
2. *Пененко В.В., Коротков М.Г.* Моделирование мезоклиматов и загрязнения атмосферы промышленных регионов (на примере г. Томска) // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10. № 6. С. 590–597.
3. *Пененко В.В., Коротков М.Г.* Применение численных моделей для прогнозирования аварийных и экологически

неблагоприятных ситуаций в атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11. № 6. С. 567–572.

4. *Марчук Г.И.* Численное решение задач динамики атмосферы и океана. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 303 с.
5. *Пененко В.В.* Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 351 с.
6. *Роуч П.* Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 616 с.
7. *Bott A.A.* Positive Definite Advection Scheme Obtained Nonlinear Renormalization of the Advective Fluxes // Mon. Wea. Rev. 1989. V. 117. P. 1006–1015.
8. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Плотников А.П., Толмачев Г.Н.* Об аномально высоких приземных концентрациях озона в районе г. Томска в зимний период // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14. № 4. С. 319–321.

M.G. Korotkov. **Formation of the urban atmospheric circulation at low velocities of background flow.**

The features of formation of the urban atmospheric circulation at low velocities of background flow are discussed. The results of numerical experiments of modeling the scenario of daily variation of the Tomsk atmospheric circulation in winter are presented.