

ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

УДК 551.509.32

А.В. Старченко, А.А. Барт, Д.В. Деги, В.В. Зуев, А.П. Шелехов,
Н.К. Барашкова, А.С. Ахметшина

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ВБЛИЗИ АЭРОПОРТА БОГАШЕВО

Введение*

Слой атмосферы, прилегающий к земной поверхности, в котором распределение метеорологических величин определяется влиянием подстилающей поверхности и турбулентностью, носит название пограничного слоя атмосферы. В нижнем приземном его подслое (толщиной 30-50 м.) осуществляет свою жизнедеятельность человек. Опасные явления, формирующиеся в этом слое (туманы, метели, осадки, гололедно-изморозевые отложения, такие конвективные явления как гроза, шквал, смерч), серьезно осложняют (в отдельных случаях и до катастрофических последствий) функционирование многих хозяйственных объектов, в т.ч. наземного и воздушного транспорта, энергетики. Особую опасность для жизнедеятельности представляет ухудшение качества приземного воздуха (превышение предельно допустимых концентраций загрязняющих газов и аэрозолей) вследствие природных катаклизмов (обширных пожаров, извержений вулканов) или антропогенных выбросов (результата интенсивной хозяйственной деятельности человека на крупных урбанизированных территориях), приводящих к образованию смога, многие компоненты которого характеризуются высокой токсичностью и ослабляют видимость. В связи с этим одной из актуальнейших проблем как фундаментальных, так и прикладных наук о Земле является проблема создания информационных систем мониторинга и прогнозирования состояния приземного слоя атмосферы над населенными пунктами и крупными транспортными узлами. Особое значение такие исследования приобретают в связи с необходимостью обеспечения безопасности жизнедеятельности в крупных аэропортах, где возникновение локальных неблагоприятных атмосферных явлений может привести к чрезвычайным ситуациям. Проблема может быть решена только при внедрении высокоточных измерительных приборов, рабо-

тающих в системе с результатами математического моделирования конкретной ситуации.

Не менее важное значение имеют: интерпретация результатов численного моделирования в терминах явлений и параметров приземной погоды, в том числе оценка возможности возникновения и интенсивности опасных явлений и резких изменений погоды; оценка влияния локальных физико-географических особенностей района прогноза на эволюцию погодообразующих структур.

Целью данной работы является апробация имеющегося программного обеспечения и измерительных приборов для исследования состояния атмосферного пограничного слоя над аэропортом Богашево, расположенным вблизи г. Томск.

Математическая модель и численный метод решения

В данной работе численное исследование локальных атмосферных процессов над ограниченной территорией проводилось с помощью разрабатываемой в Томском государственном университете мезомасштабной метеорологической модели высокого разрешения [1,2]. Эта модель является негидростатической и включает трехмерные нестационарные уравнения гидротермодинамики атмосферного пограничного слоя с параметризацией турбулентности, микрофизики влаги, длинноволновой и коротковолновой (солнечной) радиации, адвективного и скрытого потоков тепла в атмосфере и на границе ее взаимодействия с подстилающей поверхностью. Ниже в предположении квазистационарного изменения плотности воздуха представлены основные уравнения модели [3].

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

Уравнения движения

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho f v + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z^m \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (2)$$

* Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 (госконтракт № 14.В37.21.0667) и РФФИ (грант № 12-01-00433а)

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} - \rho f u +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{xy} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z^m \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} - \rho g +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{xy} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z^m \frac{\partial w}{\partial z} \right), \quad (4)$$

Уравнение притока тепла

$$\rho \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{xy} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z^h \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\theta}{c_p T} (Q_{rad} - \rho L_w \Phi_v), \quad (5)$$

Уравнение притока влаги

$$\rho \left(\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial q}{\partial x} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{xy} \frac{\partial q}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z^h \frac{\partial q}{\partial z} \right) + \rho (\Phi_v + \Phi_{cloud}), \quad (6)$$

Уравнение водности

$$\rho \left(\frac{\partial q_{rain}}{\partial t} + u \frac{\partial q_{rain}}{\partial x} + v \frac{\partial q_{rain}}{\partial y} + w \frac{\partial q_{rain}}{\partial z} \right) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial q_{rain}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{xy} \frac{\partial q_{rain}}{\partial y} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z^h \frac{\partial q_{rain}}{\partial z} \right) + \rho \Phi_{rain} - \frac{\partial (\rho W_{rain} q_{rain})}{\partial z}, \quad (7)$$

Уравнение состояния

$$p = \rho R T, R = R_0 \left((1-q) / M_{air} + q / M_{H_2O} \right). \quad (8)$$

Здесь x, y, z – декартовы координаты; ось Ox направлена на восток, ось Oy – на север; u, v, w – компоненты скорости ветра; ρ, p, T – плотность, давление и температура воздуха; q – суммарная

удельная влажность, состоящая из парообразной и облачной влаги; q_{rain} – дождевая влага; $\Phi_v, \Phi_{cloud}, \Phi_{rain}, \Phi_v + \Phi_{cloud} + \Phi_{rain} = 0$ – массовые скорости образования водяного пара, облачной и дождевой влаги соответственно, выражения для которых взяты из модели «теплого дождя» Кесслера [4]; W_{rain} – скорость осаждения дождевой воды; f – параметр Кориолиса; K_{xy}, K_z^m, K_z^h – коэффициенты турбулентной диффузии (горизонтальной, вертикальной для количества движения и тепла), которые рассчитывались с использованием дифференциальной модели турбулентности [1]; g – ускорение свободного падения; $\theta = T(p_0/p)^{R/c_p}$ – потенциальная температура; R_0 – газовая постоянная; M_{air}, M_{H_2O} – молекулярный вес сухого воздуха и паров воды; $c_p = (1-q)c_{air} + qc_{pH_2O}$ – теплоемкость воздуха; Q_{rad} – падающий радиационный поток, учитывающий поглощение, отражение и рассеяние длинноволновой и коротковолновой радиации [5].

Граничные условия для системы уравнений (1) – (8) должны быть заданы на шести гранях параллелепипеда, ограничивающего область исследования.

На верхней границе при $z=H$:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0, w = 0, \frac{\partial \theta}{\partial z} = \gamma, \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial q_{rain}}{\partial z} = 0. \quad (9)$$

На боковых открытых поверхностях использовались так называемые «радиационные» граничные условия в форме Клемпа – Вильгельмсона [1], обеспечивающие устойчивость и баланс при получении численного решения за счет минимальной деформации и отражения возмущений, покидающих расчетную область.

На нижней границе области задавались потоки тепла, влаги и трение в соответствии с основными соотношениями теории подобия Монина-Обухова [2,3]. Температура поверхности почвы находилась из решения одномерного нестационарного уравнения теплопроводности с постоянными коэффициентами, значения которых зависят от типа категории землепользования почвы.

Нижняя граница области исследования совпадает с поверхностью, поэтому для учета орографической неоднородности расчеты проводятся в криволинейной системе координат, связанной с

Таблица. Технические характеристики метеостанции WXT520

	Метеорологический параметр	Диапазон	Точность измерения
1	Давление	600 – 1100 гПа	±0,5 гПа при 0 – 30 С, ±1,0 гПа при –50 – +60 С
2	Температура	–52 – +60 С	±0,3 С
3	Относительная влажность	0 – 100%	±3% при 0 – 90%, ±5% при 90 – 100%
4	Скорость ветра	0 – 60 м/с	±0,3 м/с
5	Направление ветра	0 – 360 градусов	±2 градуса
6	Жидкие осадки	0 – 250 мм/час	5%

декартовой следующим преобразованием ($\delta(x,y)$ – рельеф поверхности области исследования):

$$\xi = x, \eta = y, \zeta = H(z - \delta(x, y)) / (H - \delta(x, y)). \quad (10)$$

Задача решается численно методом сеток. Расчетная область составляется конечным числом непересекающихся конечных объемов. Значения компонент скорости ветра определяются на гранях конечных объемов, скалярных характеристик – в центре. Дискретизация дифференциальных уравнений относительно пространственных координат осуществляется с использованием метода конечных объемов [6], по времени применяется явная трехслойная схема Адамса–Башфорта, которая имеет второй порядок аппроксимации по времени. Из-за того, что схема условно устойчива, а мезомасштабные модели, как правило, используют

сетки с небольшим вертикальным шагом вблизи подстилающей поверхности, то для уменьшения ограничений на шаг по времени используется схема Кранка – Николсона для аппроксимации диффузионного слагаемого относительно координаты z . При аппроксимации конвективных членов уравнений применяется монотонизированная противопотоковая схема MLU Ван Лира [7], минимизирующая влияние схемной диффузии. Окончательно получается система разностных трехточечных линейных уравнений, решаемая методом прогонки вдоль вертикальной координаты для каждого узла горизонтального сечения сеточной области. Согласование полей скорости и давления осуществляется с помощью схемы «предиктор-корректор», в которой на этапе коррекции компонент скоростей решается разностное уравнение Пуассона с помощью полинейного метода верхней

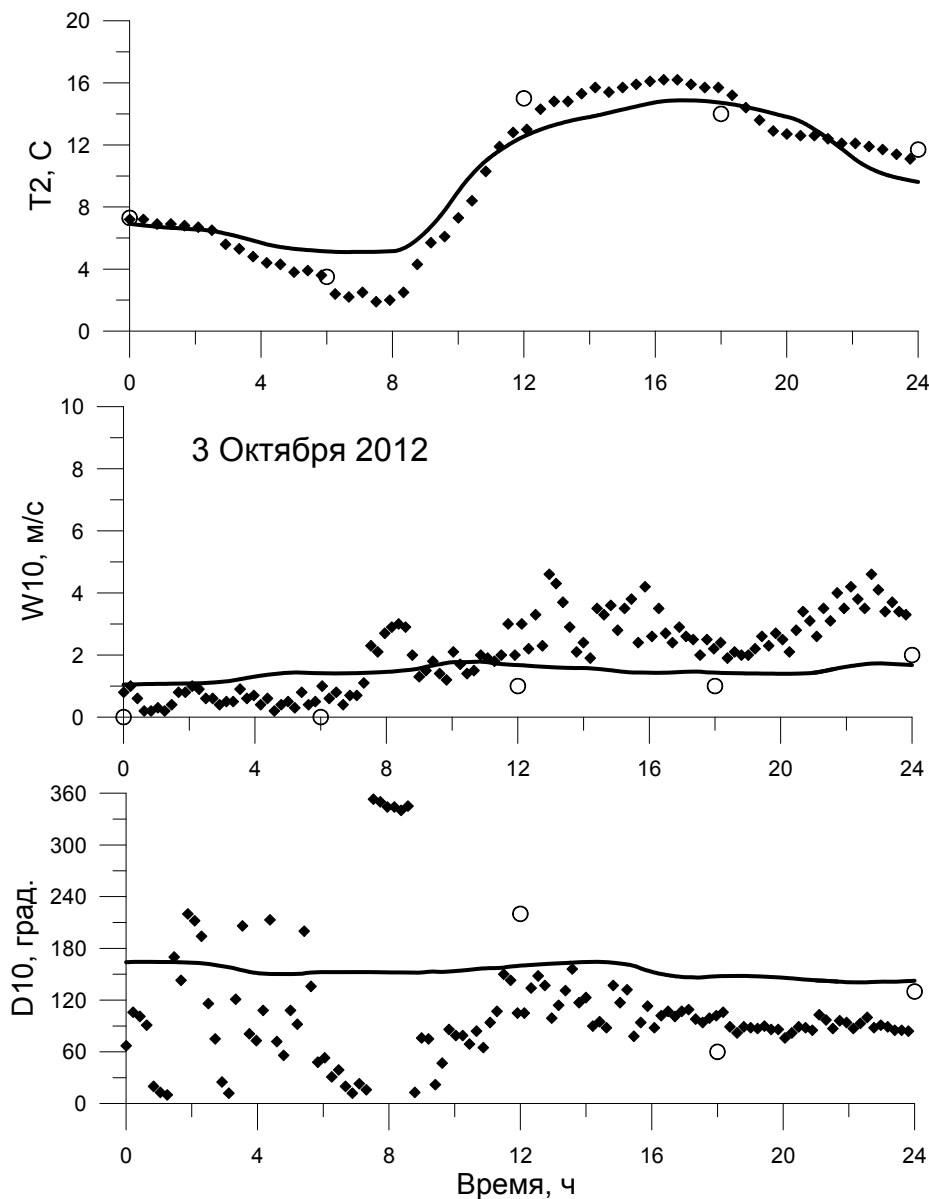


Рис.1 Рассчитанные и измеренные значения приземной температуры T_2 , скорости W_{10} и направления D_{10} ветра над аэропортом Богашево 3 октября 2012 года. \blacklozenge – измерения WTX-520, \circ – данные с сайта meteo.infospace.ru. Сплошная кривая – расчет по модели. Время местное

релаксации SOR и «красно-черного» упорядочивания узлов сетки в плоскости *Oxy* [2].

Приборы для измерений метеорологических параметров

Для исследования погоды вблизи аэропорта использовался измерительный комплекс, в состав которого входит:

1. Сертифицированный метеорологический температурный профилемер МТП-5 (версия расширенного температурного диапазона и высокого разрешения, производство ООО «НПО АТТЕХ»);

2. Автоматическая метеорологическая станция WXT520 («VaisalaOyj», Финляндия).

Метеорологические величины в нижнем слое атмосферы имеют хорошо выраженный суточный ход и значительную межсуточную изменчивость. Наблюдения за его состоянием в аэропортах с помощью стандартных средств радиозондирования не соответствуют временным и пространственным масштабам этой изменчивости. Измерительный комплекс МТП-5 позволяет отображать термическую структуру нижнего 1000-метрового слоя атмосферы и получать ее временную динамику с дискретностью по вертикальной координате 10-50 м. и периодичностью 5 мин. Диапазон измерения температуры от -50 до $+50^{\circ}\text{C}$. Метеорологический температурный

профилемер МТП-5 дополнительно укомплектован автоматической метеорологической станцией WXT520. Она в автоматическом режиме измеряет приземные значения атмосферного давления, температуры, относительной влажности, скорости и направления ветра, выпавшие жидкие осадки и град. В таблице представлены некоторые технические характеристики метеостанции.

Приборы измерительного комплекса регулярно передают данные измерений на компьютер, с которого затем удаленно собираются сетевым хранилищем в архив наблюдений.

Некоторые результаты и их обсуждение

Разработанная мезомасштабная модель и измерительный комплекс были применены к исследованию метеорологических условий над аэропортом Богашево ($85,21^{\circ}\text{E}$ $56,38^{\circ}\text{N}$). При расчете характеристик атмосферного пограничного слоя с целью уменьшения неопределенности задания граничных условий использовалась технология вложенных расчетов. Первоначально расчеты проводились для области размером $200 \times 200 \text{ км}^2$, в центре которой находится г. Томск ($85,0^{\circ}\text{E}$ $56,5^{\circ}\text{N}$). Результаты расчетов затем использовались для определения граничных условий для исследования состояния атмосферы над территорией размером $50 \times 50 \text{ км}^2$, положение центра которой

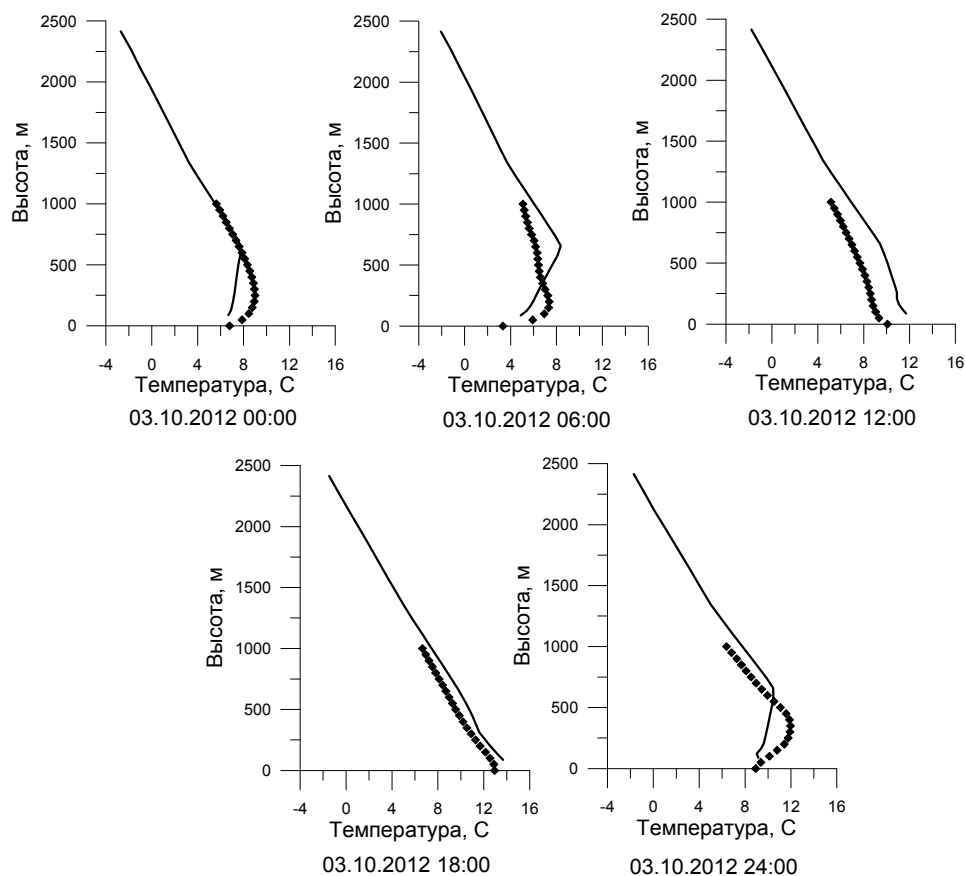


Рис.2. Вертикальные профили температуры над аэропортом Богашево 3 октября 2012 года, измеренные температурным профилемером МТП-5 (значки \blacklozenge), и рассчитанные с помощью мезомасштабной модели (сплошные кривые)

совпадает с центром области $200 \times 200 \text{ км}^2$. Такой подход позволил повысить разрешение метеорологической модели до 1 км и использовать в расчетах 30 уровней по вертикальной координате. При задании свойств подстилающей поверхности рассматривалось семь категорий землепользования: водная поверхность, поверхность с незначительной растительностью, сельскохозяйственные угодья, лиственный, смешанный и хвойный лес, городская застройка. Эти категории отличались по следующим параметрам: высота шероховатости, альbedo, теплофизические свойства почвы, параметр испарения, степень черноты, температура на глубине 2 м (для почвы).

На рис.1 представлены рассчитанные по модели и измеренные значения приземного ветра и температуры воздуха для района аэропорта Богашево за 3 октября 2012 года. Кроме того, привлекались данные стандартных наблюдений в основные метеорологические сроки (0, 6, 12, 18, 24 ч., время местное), представленные на сайте meteo.infospace.ru. В течение суток происходило увеличение облачности от 0 – 9 баллов, давление понизилось с 1019 гПа до 1009 гПа. Ветер при небольшой скорости от штиля до 2 м/с был неустойчив, но преимущественно с северной составляющей. Наблюдался хорошо выраженный суточный ход температуры воздуха (амплитуда составила $11,5 \text{ }^\circ\text{C}$). Выпадение осадков в этот день не отмечалось. Такие условия погоды сформировались в теплом секторе полярнофронтального циклона, центр которого располагался над южным Уралом. К концу анализируемых суток через Томск прошел теплый фронт.

Из рисунка видно, что в дневное время рассчитанные по модели значения приземной температуры лучше соответствуют измерениям, выполненным с помощью метеостанции WTX520, которая расположена на территории аэропорта. Согласованность представленных на рис. 1 кривых по температуре удовлетворительная. Наибольшие расхождения между результатами расчетов и измерений температуры (до 3°C) наблюдались в утренние часы. В целом можно отметить некоторую сглаженность кривых изменения метеорологических величин по модели, т.е. она недостаточно реагирует на более мелкие пульсации характери-

стик.

На рис. 2 представлено сопоставление рассчитанных и измеренных вертикальных профилей температуры в течение суток 3 октября 2012 года. Анализ данных, полученных на температурном профиломере, показывает, что в период наблюдений было зафиксировано уменьшение высоты турбулентного приземного слоя в ночные и утренние часы (см. 0:00, 6:00 и 24:00 местного времени). Результаты численных расчетов для этих значений времени суток дают несколько завышенные значения этой же характеристики. В дневное время суток (см. 18:00 местного времени), когда поверхность Земли интенсивно нагревается солнечными лучами и возникает вертикальное турбулентное перемешивание в атмосферном пограничном слое над территорией аэропорта, измерения и расчеты хорошо согласуются. Таким образом, сопоставление показывает, что мезомасштабная метеорологическая модель высокого разрешения [1, 2] дает хорошее количественное согласие с экспериментом в ситуации, когда учет в расчетах конвективных турбулентных эффектов в пограничном слое является определяющим. В ночные и утренние часы, когда интенсивность турбулентности падает, результаты численного моделирования дают хорошее качественное согласие с экспериментом.

Заключение

Представлены компоненты информационного измерительно-вычислительного комплекса, создаваемого для мониторинга и прогнозирования опасных погодных явлений над аэропортами.

Произведена апробация имеющегося программного обеспечения и измерительных приборов для исследования состояния атмосферного пограничного слоя над аэропортом Богашево.

Результаты исследования продемонстрировали перспективность использования информационного измерительно-вычислительного комплекса для мониторинга условий погоды на объектах воздушного транспорта. В дальнейшем необходимо продолжить его апробацию и для других метеорологических характеристик и атмосферных явлений, в частности, определяющих видимость в районе аэродромов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старченко, А.В. Численное исследование локальных атмосферных процессов //Вычислительные технологии, 2005. -Т.10. -С. 81-89.
2. Старченко, А.В. Численное моделирование локальных атмосферных процессов с использованием многопроцессорных вычислительных систем / А.В. Старченко, Д.В. Деги // Научный сервис в сети Интернет: поиск новых решений: Труды Международной суперкомпьютерной конференции (17-22 сентября 2012 г., г. Новороссийск). – М.: Изд-во МГУ, 2012. -С. 536-541.
3. Пененко, В.В. Модели и методы для задач охраны окружающей среды/ В.В. Пененко, А.Е. Алоян. - М.: Наука, 1985.
4. Kessler, E. On distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation //Bullitin of American Meteorological Society, 1969. -N.32. -P. 84-112.

5. *Mahrer, Y.* The Effects of Topography on Sea and Land Breezes in a Two-Dimensional Numerical Model /Y. Mahrer, R. Pielke // *Monthly Weather Review*, 1977. -V.105. -P. 1151–1162.

6. *Патанкар, С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

7. *Есаулов, А.О.* К выбору схемы для численного решения уравнений переноса /А.О. Есаулов, А.В. Старченко // *Вычислительная гидродинамика*. – Томск: Изд-во Томского университета, 1999. -С. 27–32.

□ Авторы статьи:

Старченко Александр Васильевич, докт. физ.-мат. наук, проф., зав. каф. вычислительной математики и компьютерного моделирования ТГУ, email: starch@math.tsu.ru	Барт Андрей Андреевич, про- граммист каф. вычисли- тельной математики и компьютерного моделиро- вания ТГУ, email: bart@math.tsu.ru	Деги Дмитрий Владимирович, аспирант каф. вычисли- тельной математики и компьютерного моделиро- вания ТГУ, email: dimadegi@math.tsu.ru	Зуев Владимир Владимирович, член-корр. РАН, докт. физ.- мат. наук, проф., зам. ди- ректора по научной работе Института мониторинга и климато-экологических систем СО РАН, email: ref_zuev@iao.ru
Шелехов Александр Петрович, канд. физ.-мат. наук, н. с. лабор. геосферно- биосферных взаимодейст- вий Института монито- ринга и климато- экологических систем СО РАН, email: ash@imces.ru	Барашкова Надежда Константиновна, канд. техн. наук, доцент каф. метеорологии и кли- матологии ТГУ, email: meteo@ggf.tsu.ru	Ахметшина Анна Сергеевна, старший лаборант каф. метеорологии и климато- логии ТГУ, email: meteo@ggf.tsu.ru	