

## 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.В.37.21.0667) 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;  $\rho, p, T$  – 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;  $\theta = T(p/p_0)^{R/c_p}$  – 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 границах 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

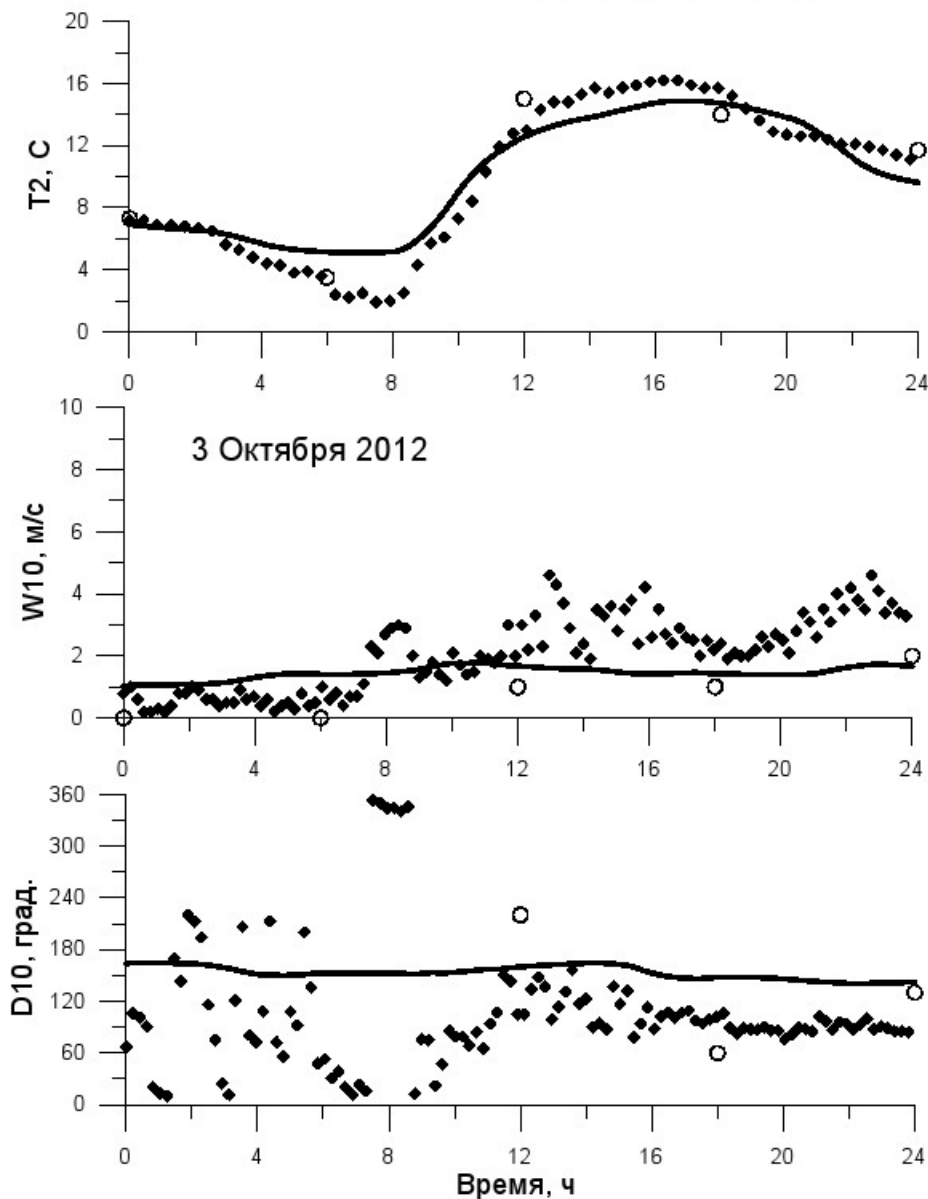


Рис.1 Рассчитанные и измеренные значения приземной температуры  $T_2$ , скорости  $W_{10}$  и направления  $D_{10}$  ветра над аэропортом Богашево 3 октября 2012 года.  $\blacklozenge$  – измерения WTX-520,  $\circ$  – данные с сайта [meteo.infospace.ru](http://meteo.infospace.ru). Сплошная кривая – 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

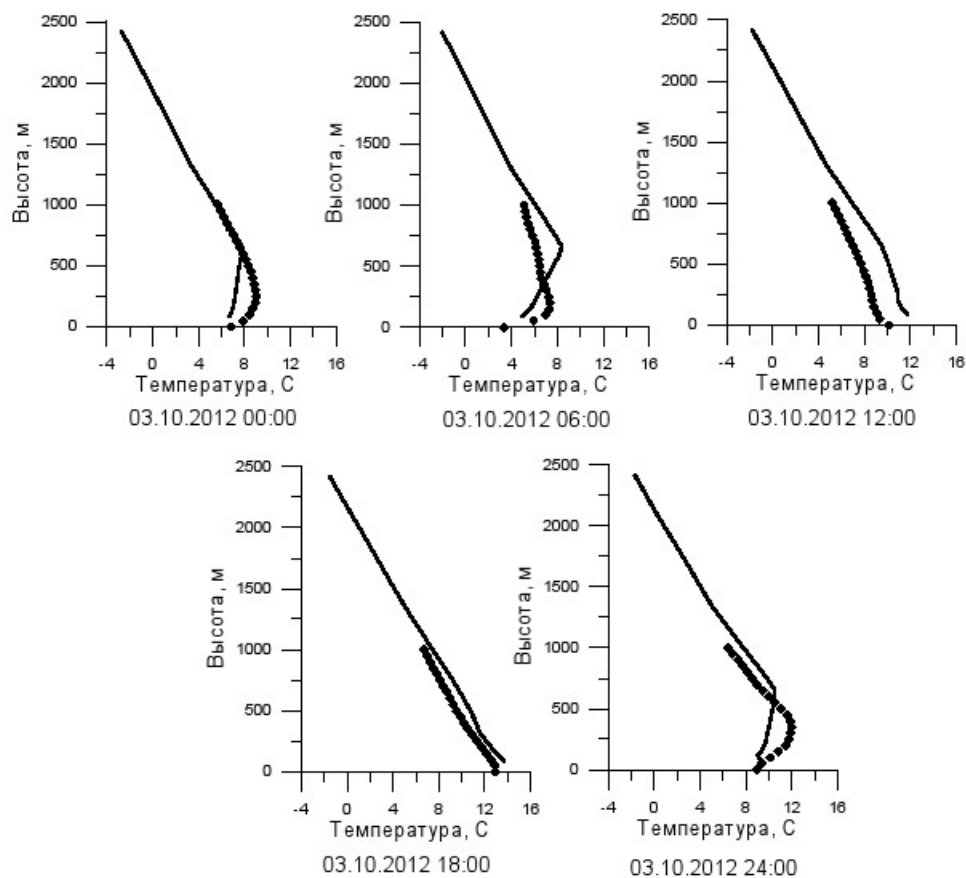


Рис.2. Вертикальные профили температуры над аэропортом Богашево 3 октября 2012 года, измеренные температурным профилемером МТП-5 (значки  $\blacklozenge$ ), и рассчитанные с помощью мезомасштабной модели (сплошные кривые)

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](http://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 °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 //Bulltin 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](mailto:meteo@ggf.tsu.ru)

УДК 519.21

А.В.Бирюков

## ЗАДАЧИ ГРАНУЛОМЕТРИИ

Объектом гранулометрического анализа является дисперсная система из частиц случайных размеров и формы. Размер частиц определяется ее диаметром  $x$  (наибольшим расстоянием между точками поверхности), который как случайная величина распределен с плотностью  $p(x)$  и начальными моментами  $M(k)$ , равными математическому ожиданию  $k$ -ой степени диаметра. Форму частицы характеризуют ее меры сферичности  $\alpha$  и  $\beta$ , равные отношению площади поверхности и объема частицы к квадрату и кубу диаметра. В силу экстремальных свойств шара эти меры удовлетворяют неравенствам  $\alpha < \pi$  и  $\beta < \pi/6$ .

Измерениями частиц геоматериалов установлено, случайные величины  $\alpha$  и  $\beta$  обладают незначительной вариацией (с коэффициентом вариации 7%) и имеют параметры рассеяния  $\alpha = 2$  и  $\beta = 0.2$ .

Малая вариация мер сферичности частиц конкретной дисперсией системы позволяет считать их постоянными без ущерба для точности гранулометрических расчетов. В этом случае математические ожидания площади поверхности и объема частицы равны соответственно  $\alpha \cdot M(2)$  и  $\beta \cdot M(3)$ .

При этом отношение  $F = \alpha \cdot M(2) / \beta \cdot M(3)$  равно суммарной площади поверхности частиц в единичном объеме и играет основную роль в процессах дробления.

Эффективность дробления горных пород

взрывом характеризуется отношением энергии дробления, т.е. образования новой поверхности, ко всей энергии взрыва. Это отношение можно представить в виде  $H = EF/GQ$ , где  $E$  - емкость дробления, равная количеству энергии, затраченному на образование единицы площади новой поверхности;  $F$  - суммарная площадь поверхности частиц (продуктов дробления) в единичном объеме;  $Q$  - удельный (на единицу объема) расход взрывчатых веществ;  $G$  - их энергетический потенциал;  $H$  - коэффициент полезного (дробящего) действия взрыва.

Энергоемкость дробления горных пород, как показывают результаты лабораторных исследований, пропорциональна пределу их прочности при одноосном сжатии. Причем, если единицами измерения энергоемкости дробления  $E$  и предела прочности  $P$  являются килоджоуль/м<sup>3</sup> и мегапаскаль, то  $E \approx 0.2P$ .

Величина  $F$ , как отмечено выше, равна  $\alpha \cdot M(2) / \beta \cdot M(3)$  и при  $\alpha = 2, \beta = 0.2$  получим  $F = 10 \cdot M(2) / M(3) = 10/D$ , где  $D = M(3) / M(2)$  - средне-взвешенный по площади поверхности диаметр частиц. При открытой разработке угольных месторождений осадочные породы делят на пять категорий с пределами прочности 40, 60, 80, 100 и 120 мегапаскалей и взрывают с удельными расходами взрывчатых веществ соответственно 0.4, 0.6,