

Декабрьские чтения в Томске, Томск, ТГУ 11-16.12.2018

**Вычислительные технологии в
задачах динамической метеорологии
и оценки качества атмосферного
воздуха**

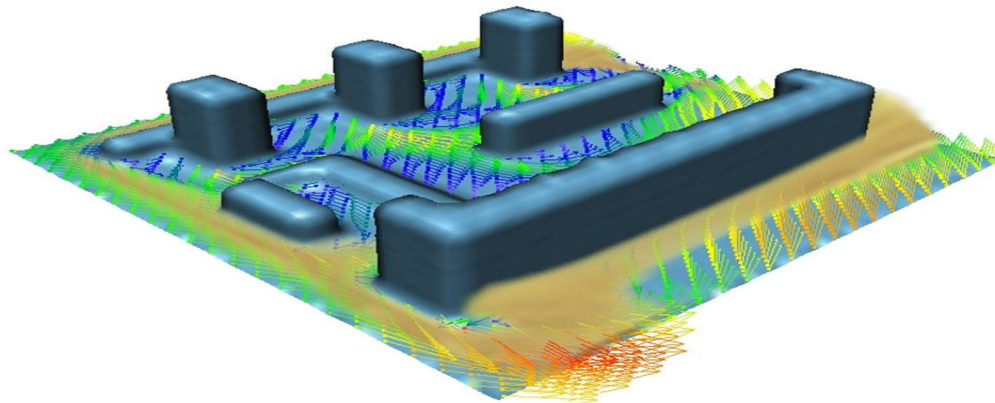
А.В.Старченко

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
ТФ Института вычислительных технологий СО РАН*

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-41-700178p_a)

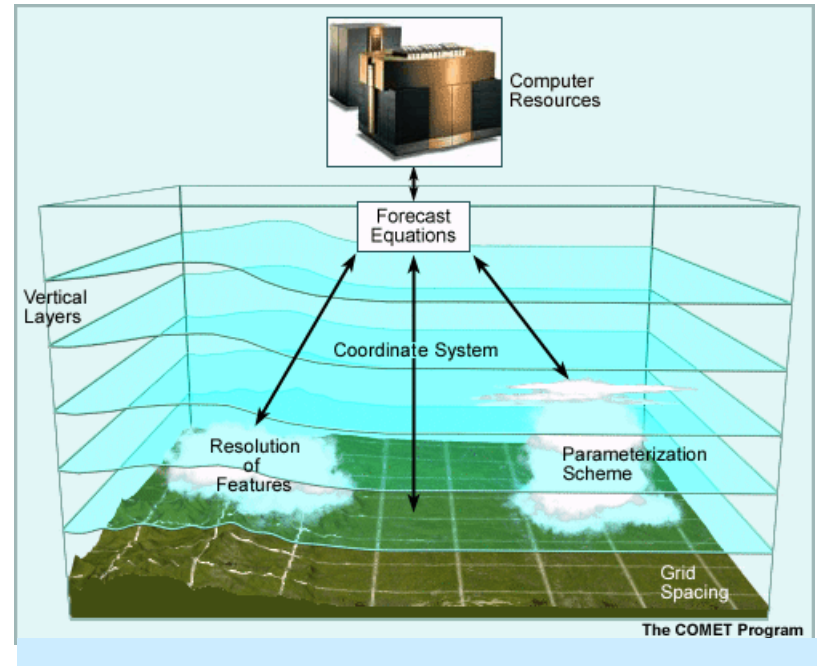
Введение

Одним из способов исследования и прогноза развивающихся над ограниченной территорией локальных атмосферных процессов является математическое моделирование, опирающееся на использование мезомасштабных метеорологических моделей.



Мезомасштабные модели и процессы

- Мезомасштабные погодные явления возникают вследствие влияния топографии или свойств подстилающей поверхности и связаны с конвекцией. Их горизонтальные масштабы от 1000 до 10 км. Грозы, горные ветры, бризы, шквальные ветры, городская циркуляция.
- Мезомасштабная модель – математическая модель для расчета погоды над ограниченной территорией с достаточно высоким разрешением



ММ применяются в областях, где условия окружающей среды изменяются существенно во времени и пространстве

Немного истории...

- В 1904 году Бьеркнес предложил для количественного описания погоды использовать систему уравнений гидродинамики и термодинамики
- В 1922 году Ричардсон применил численные методы для исследования прогноза погоды
- В 1939 году Россби продемонстрировал применение линеаризованных уравнений движения к предсказанию погоды.
- Первый успешный численный расчет погоды был сделан Чарни и др. (1950) на основе модели Россби, в которую были добавлена нелинейная адвекция. Эта модель была реализована на ЭВМ ENIAC.
- В 60х годах появились первые мезомасштабные модели для ограниченных территорий

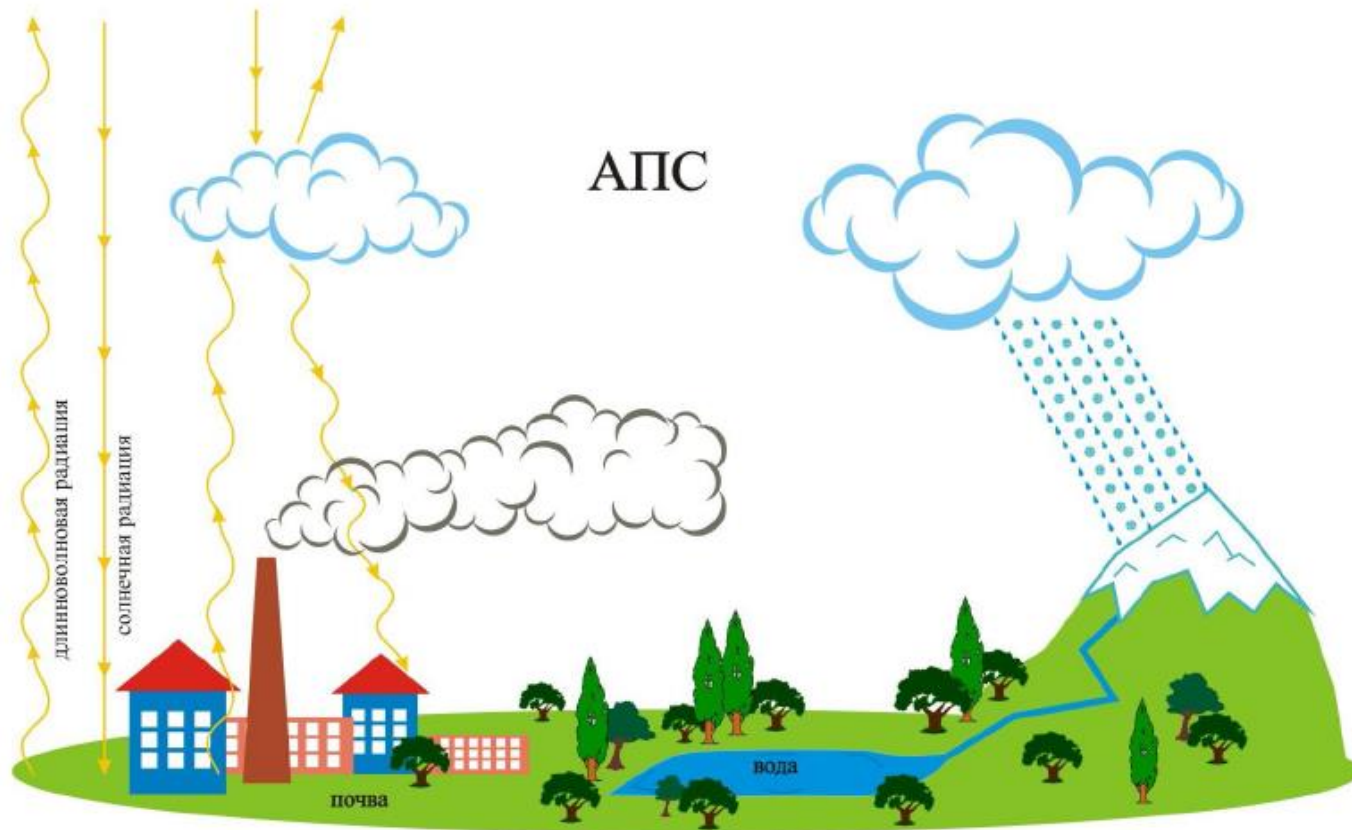
Современные мезомасштабные МОДЕЛИ

- Fifth-Generation Mesoscale Model (MM5) – разработана университетом Пенсильвании и НЦАИ США;
- Weather Research and Forecasting (WRF) – разработана НЦАИ и НЦИОС США;
- Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) – разработана Университетом Колорадо;
- The Air Pollution Model (TAPM) – разработана ЦАИ Австралии;
- Consortium for Small-Scale Modelling (COSMO-model) – разработана DWD Германии.

**TSU-NM3 ::= Tomsk State University Nonhydrostatic
Mesoscale Meteorology Model**

Мезомасштабные модели

включают, как правило, нестационарные трехмерные уравнения гидротермодинамики и отличаются различными подходами параметризации атмосферных процессов.



Основные уравнения ММ

Уравнение неразрывности

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

Уравнения движения

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho f v + K_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_Z^m \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} - \rho f u + K_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_Z^m \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + K_H \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_Z^m \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

Основные уравнения ММ

Уравнение баланса энергии

$$\rho \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{xy} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z^h \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\theta}{c_p T} (Q_{rad} - \rho L_w \Phi_v),$$

Уравнение влагообмена ($T > 0$, Kessler, 1969)

$$\rho \left(\frac{\partial q_v}{\partial t} + u \frac{\partial q_v}{\partial x} + v \frac{\partial q_v}{\partial y} + w \frac{\partial q_v}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial q_v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{xy} \frac{\partial q_v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z^h \frac{\partial q_v}{\partial z} \right) + \rho \Phi_v,$$

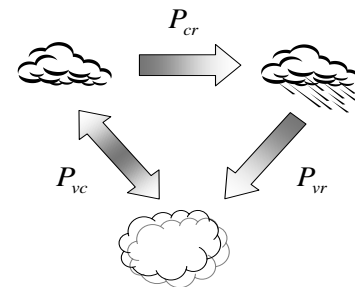
$$\rho \left(\frac{\partial q_{cloud}}{\partial t} + u \frac{\partial q_{cloud}}{\partial x} + v \frac{\partial q_{cloud}}{\partial y} + w \frac{\partial q_{cloud}}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial q_{cloud}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{xy} \frac{\partial q_{cloud}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z^h \frac{\partial q_{cloud}}{\partial z} \right) + \rho \Phi_{cloud},$$

Уравнение водности

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

Уравнение состояния

$$p = \rho RT, R = R_0 \left((1-q) / M_{air} + q / M_{H_2O} \right) \quad \theta = T (p_0 / p)^{R/c_p}$$



Основные уравнения ММ

Модель турбулентности

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} + w \frac{\partial k}{\partial z} \right) = K_Z^m \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{\rho g}{\theta} K_Z^h \frac{\partial \theta}{\partial z} +$$
$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(1,2 \rho \sqrt{kl} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(1,2 \rho \sqrt{kl} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(1,2 \rho \sqrt{kl} \frac{\partial k}{\partial z} \right) - \frac{C_D \rho k^{1,5}}{l}$$

$$K_Z^{m,h} = \rho C_\mu f_{m,h} \sqrt{kl}$$

Краевые условия ММ

- На верхней границе (выше АПС) – равенство нулю производных по вертикальной координате

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0, w = 0, \frac{\partial \theta}{\partial z} = \gamma, \frac{\partial q_v}{\partial z} = \frac{\partial q_{cloud}}{\partial z} = 0, q_{rain} = 0.$$

- На боковых границах – граничные условия радиационного типа, обеспечивающие устойчивость и баланс за счет минимальной деформации и отражения вычислительных возмущений, покидающих расчетную область
- На нижнем вычислительном уровне (10 метров над поверхностью) – применяются соотношения теории подобия Моница-Обухова и полуэмпирические функции
- Температура поверхности рассчитывается на основе приближенного решения уравнения теплопроводности
- В качестве начальных условий используются результаты наблюдений или расчетов по глобальной модели циркуляции атмосферы ПЛАВ Гидрометцентра РФ (М.А. Толстых)

Модель ПЛАВ

Основной моделью глобального среднесрочного прогноза погоды в России с конца 2009 г. является глобальная полулагранжева модель атмосферы ПЛАВ (полулагранжева, основанная на уравнении абсолютной завихренности).

Модель разработана в Институте вычислительной математики РАН и Гидрометцентре России с помощью консорциума ALADIN/LACE, предоставившего параметризацию процессов подсеточного масштаба. Ежедневно на ftp-сервер Гидрометцентра выкладываются результаты расчетов для области, включающей город Томск.

Приземные характеристики: температура воздуха (на высоте 2м.); Относительная влажность (на высоте 2м.); Горизонтальные компоненты вектора ветра (на высоте 10м.); Давление (на высоте 2м.); Аккумулированные за 6 часов осадки; Давление на уровне моря; Влажность почвы.

Пространственные характеристики: Температура воздуха; Относительная влажность; Северная и восточная компоненты вектора ветра; Высота геопотенциала.

Численное моделирование образования вторичных загрязнителей и аэрозоля в атмосфере города

В настоящее время выбросы автомобильного транспорта в городах дают основной вклад в образование вторичных загрязнителей атмосферного воздуха в городах, включая и генерацию аэрозольных частиц размером несколько микрон, которые представляют опасность для человеческого здоровья.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial UC_i}{\partial x} + \frac{\partial VC_i}{\partial y} + \frac{\partial W_c C_i}{\partial z} = - \frac{\partial}{\partial x} \langle c_i u \rangle - \frac{\partial}{\partial y} \langle c_i v \rangle - \frac{\partial}{\partial z} \langle c_i w_c \rangle + S_i + R_i;$$
$$i = 1, \dots, n_s;$$

C_i - концентрация i -ой компоненты; S_i - источниковый член;
 R_i - химические реакции;

Таблица 1. Химические реакции модифицированного кинетического механизма образования аэрозоля

	Реакции	Скорости реакций	
1.	$R_{smog} + hv \rightarrow RP + R_{smog} + \eta SNGOC$	$r_1 = k_1 C_{Rsmog}$	GRS
2.	$RP + NO \rightarrow NO_2$	$r_2 = k_2 C_{RP} C_{NO}$	GRS
3.	$RP + RP \rightarrow RP + \alpha H_2O_2$	$r_3 = k_3 C_{RP} C_{RP}$	GRS
4.	$RP + NO_2 \rightarrow SGN$	$r_4 = k_4 C_{RP} C_{NO_2}$	GRS
5.	$RP + NO_2 \rightarrow SNGN$	$r_5 = k_7 C_{RP} C_{NO_2}$	GRS
6.	$RP + SO_2 \rightarrow SNGS$	$r_6 = k_6 C_{RP} C_{SO_2}$	GRS
7.	$H_2O_2 + SO_2 \rightarrow SNGS$	$r_7 = k_7 C_{H_2O_2} C_{SO_2}$	GRS
8.	$O_3 + SO_2 \rightarrow SNGS$	$r_8 = k_8 C_{O_3} C_{SO_2}$	GRS
9.	$NO_2 + hv \rightarrow O(^3P) + NO$	$r_9 = k_9 C_{NO_2}$	DMI
10.	$O_3 + hv \rightarrow O(^1D) + O_2$	$r_{10} = k_{10} C_{O_3}$	DMI
11.	$O(^3P) + O_2 \rightarrow O_3$	$r_{11} = k_{11} C_{O(^3P)} C_{O_2}$	DMI
12.	$O(^1D) + N_2 \rightarrow O(^3P) + N_2$	$r_{12} = k_{12} C_{O(^1D)} C_{N_2}$	DMI
13.	$O(^1D) + O_2 \rightarrow O(^3P) + O_2$	$r_{13} = k_{13} C_{O(^1D)} C_{O_2}$	DMI
14.	$O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2$	$r_{14} = k_{14} C_{O_3} C_{NO}$	DMI

Здесь R_{smog} – реагирующая часть выбрасываемого транспортом и точечными источниками смога, RP - органические радикалы, $O(^1D)$ – возбужденное состояние атомарного кислорода, $O(^3P)$ - основное состояние атомарного кислорода.

Схема замыкания уравнений

Явная анизотропная схема замыкания:

$$-\langle cu \rangle = \frac{\tau}{C_{10}} \left((1 - C_{20}) \langle cw \rangle \frac{\partial U}{\partial z} + \langle u_i u \rangle \frac{\partial C}{\partial x_i} \right);$$

$$-\langle cv \rangle = \frac{\tau}{C_{10}} \left((1 - C_{20}) \langle cw \rangle \frac{\partial V}{\partial z} + \langle u_i v \rangle \frac{\partial C}{\partial x_i} \right);$$

$$-\langle cw \rangle = \frac{\tau}{C_{10} + D_{1c} F} \left(- (1 - C_{30}) \frac{g}{\Theta} \langle c\theta \rangle + \langle u_i w \rangle \frac{\partial C}{\partial x_i} \right);$$

Соотношения
Буссинеска

$$-\langle cu_i \rangle = K_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j};$$

Уравнение для корреляции пульсаций концентрации с пульсациями температуры:

$$\frac{\partial \langle c\theta \rangle}{\partial t} + U_i \frac{\partial}{\partial x_i} \langle c\theta \rangle = - \langle cw \rangle \frac{\partial \Theta}{\partial z} - \langle \theta u_i \rangle \frac{\partial C}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \frac{k}{\varepsilon} \langle u_i u_j \rangle \frac{\partial \langle c\theta \rangle}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{\tau \cdot c_x} \langle c\theta \rangle;$$

Численные методы решения

Компьютерная реализация мезомасштабных метеорологических моделей основана на применении нетривиальных вычислительных алгоритмов и требует использования высокопроизводительных вычислительных ресурсов.



Численные методы решения

Метод сеток: равномерная широтно-долготная сетка,
неравномерная по высоте

Аппроксимация высокого порядка производных по координатам

Явно-неявная разностная схема

$$2 \frac{\Phi_{i,j,k}^{n+1} - \Phi_{i,j,k}^n}{\tau} + 3(K_x^n + K_y^n + K_z^n) - K_x^{n-1} - K_y^{n-1} - K_z^{n-1} =$$
$$3(\Lambda_x^n + \Lambda_y^n) - \Lambda_x^{n-1} - \Lambda_y^{n-1} + \Lambda_z^{n+1} + \Lambda_z^n + 3f_{i,j,k}^n - f_{i,j,k}^{n-1}$$

Условно-устойчивая: $\tau(\text{сек}) < 3dx(\text{км})$

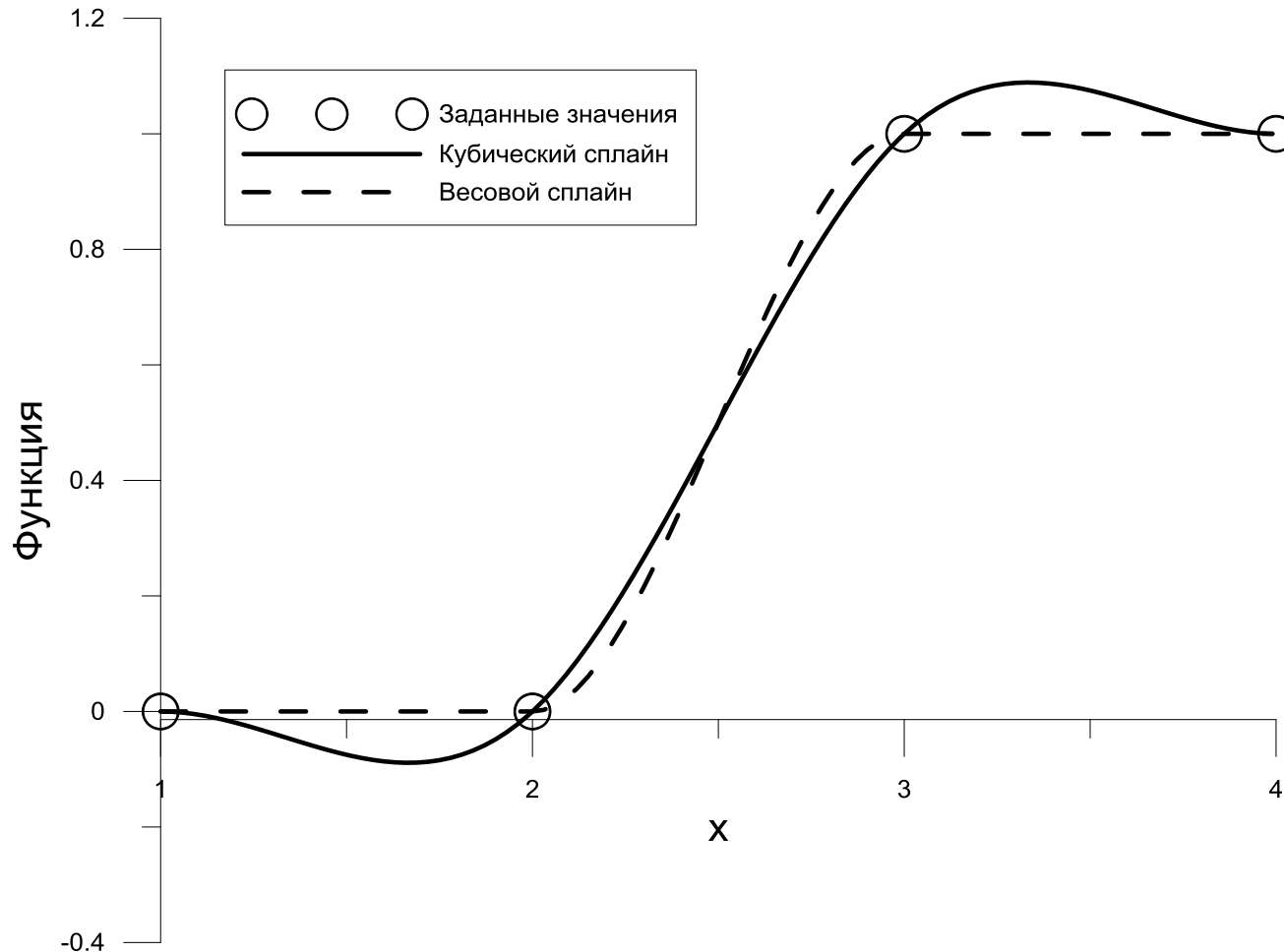
Построение параллельной версии алгоритма вычислений осуществлялось на основе принципа 2D геометрической декомпозиции сеточной области, когда вся область исследования делится на равные по количеству сеточных узлов части, вычисления в которых проводятся одновременно и независимо.

Численные методы решения

Была разработана новая монотонизированная схема повышенного порядка точности (до четвертого на участках монотонного изменения сеточной функции) для аппроксимации конвективного члена рассматриваемого типа уравнения.

Эта схема строится с использованием локальных весовых кубических сплайнов, обладающих хорошей способностью воспроизводить монотонное распределение зависимой переменной на новом шаге по времени.

Численные методы решения

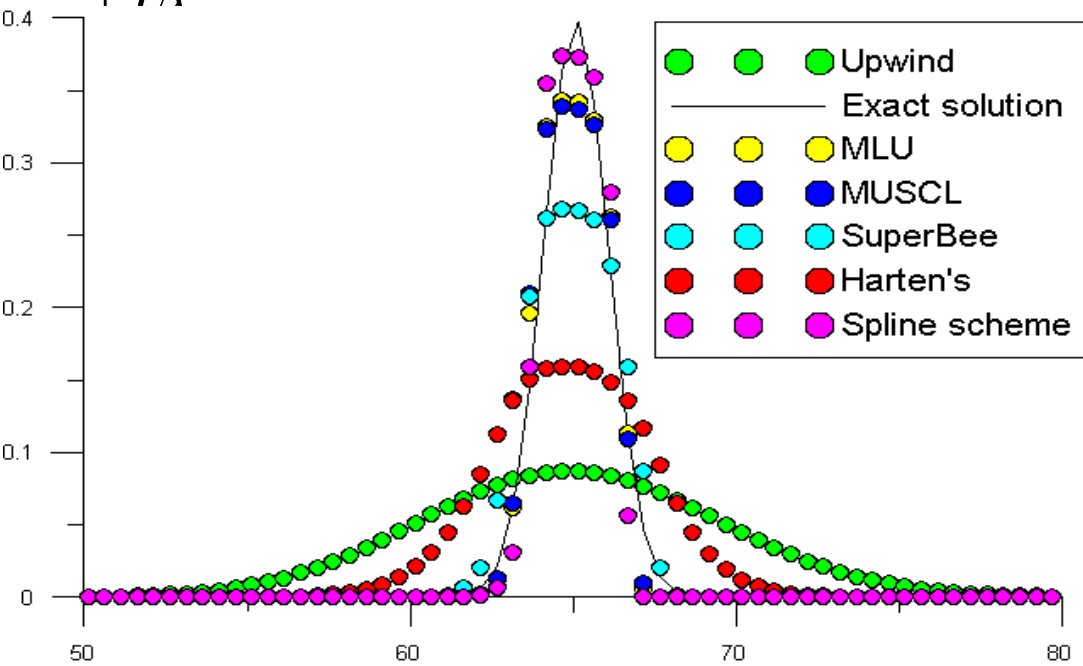


Интерполяция таблично заданной функции
алгебраическими многочленами

Численные методы решения

Тест. Распространение примеси от мгновенного источника

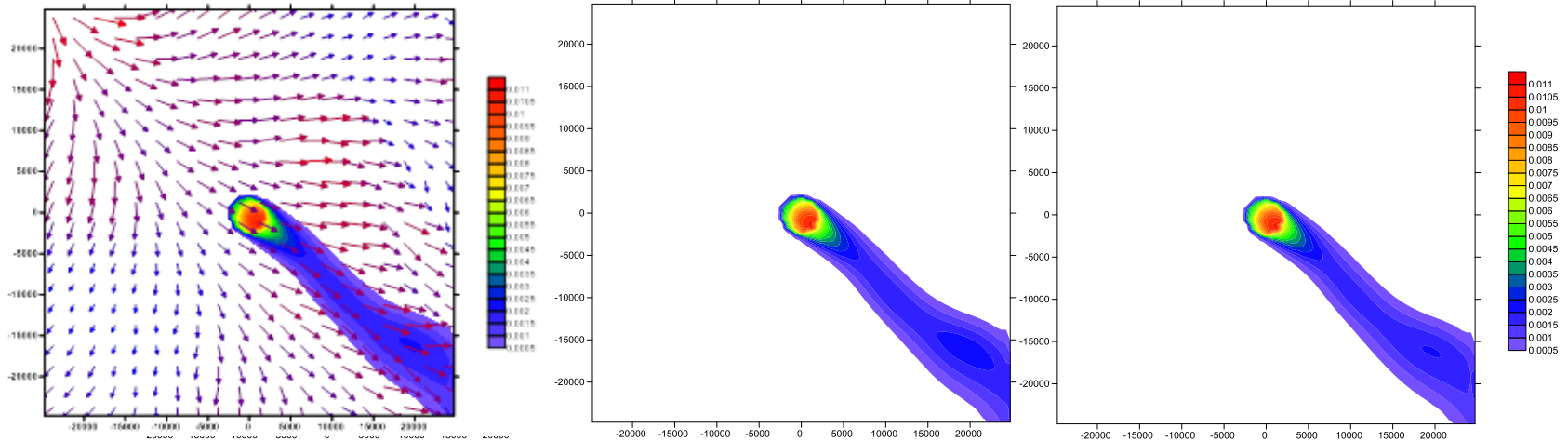
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Phi}{\partial t} + u \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \sigma \Phi = D \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + Q \delta(x - x_0) \delta(t - t_0), \quad 0 < x < X, \quad 0 < t \leq T, \\ t = 0: \quad \Phi(0, x) = 0, \quad u = 1, \quad D = 0.01, \quad \sigma = 0, \quad Q = 1, \quad X = 100, \\ \Phi(t, 0) = 0, \quad T = 100, t_0 = 0.5T, x_0 = 15. \\ \frac{\partial \Phi}{\partial x}(t, X) = 0. \quad M = 100, M = 200, u\tau / h = 0.2 \end{array} \right.$$



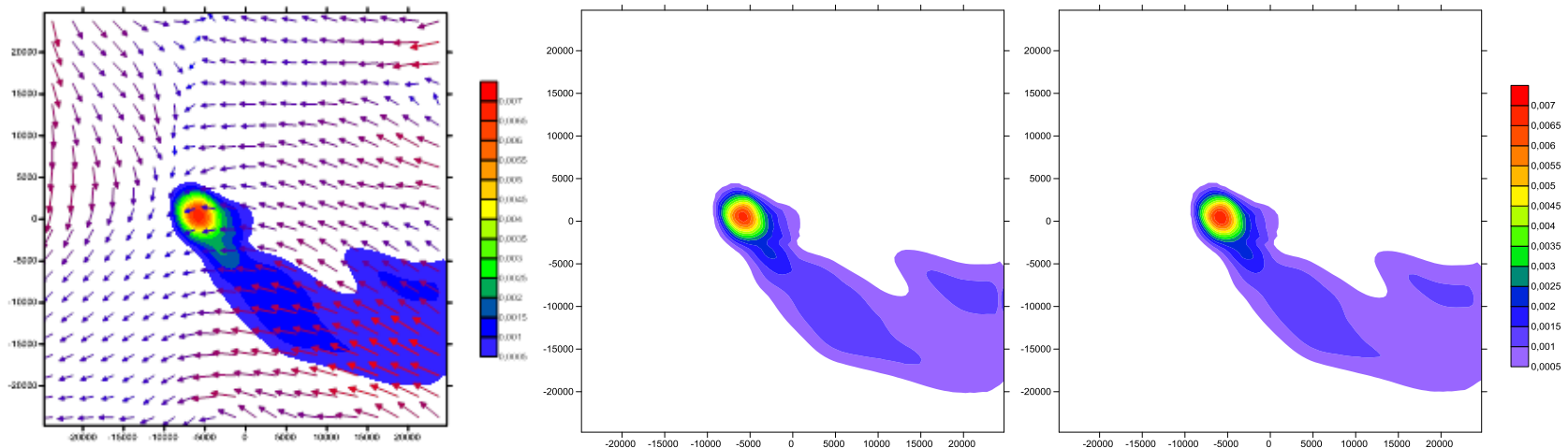
Рассчитанные значения
концентрации примеси
 $t=T, M=200$

Численные методы решения

Тест. Распространение примеси от постоянного источника



Распространение концентрации примеси после 29 часов моделирования

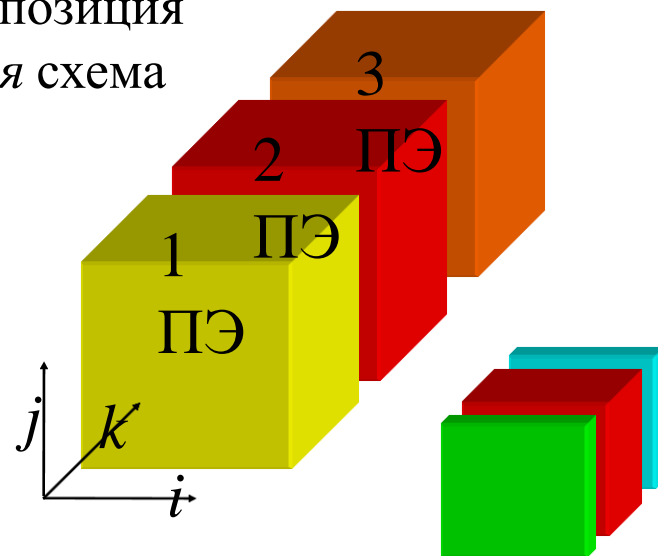


Распространение концентрации примеси после 41 часа моделирования

Распараллеливание

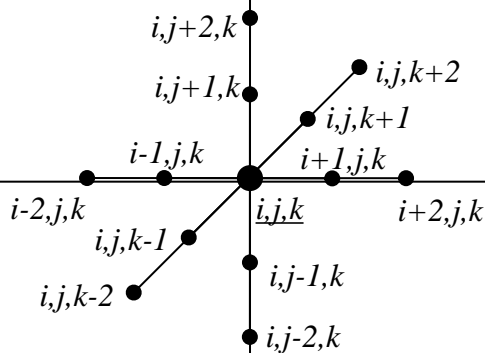
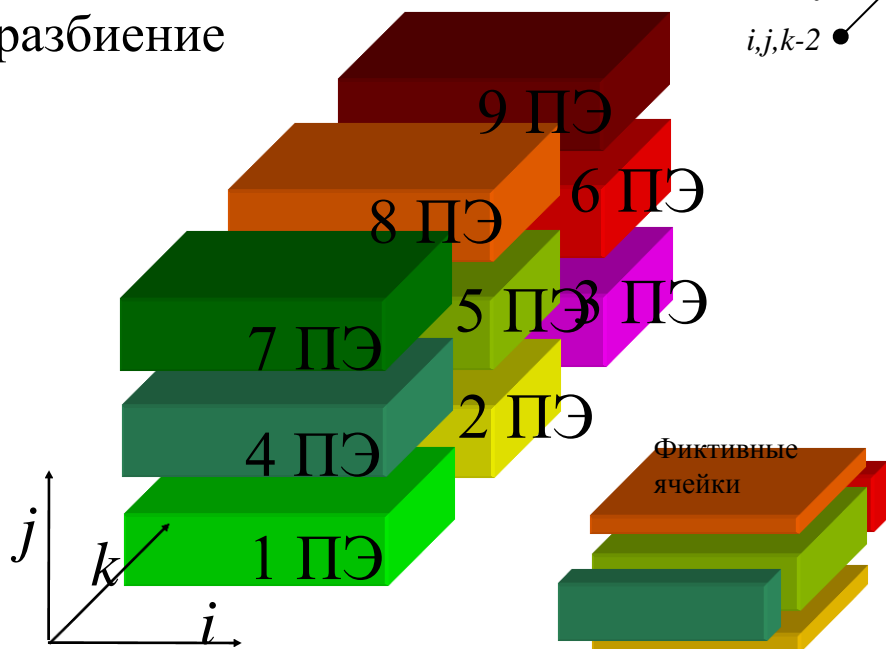
Наиболее общим подходом равномерного распределения вычислительной нагрузки между вычислительными узлами при решении сеточных уравнений является распределение вычислительных областей на подобласти. Так называемый принцип геометрической декомпозиции.

1D-декомпозиция ленточная схема

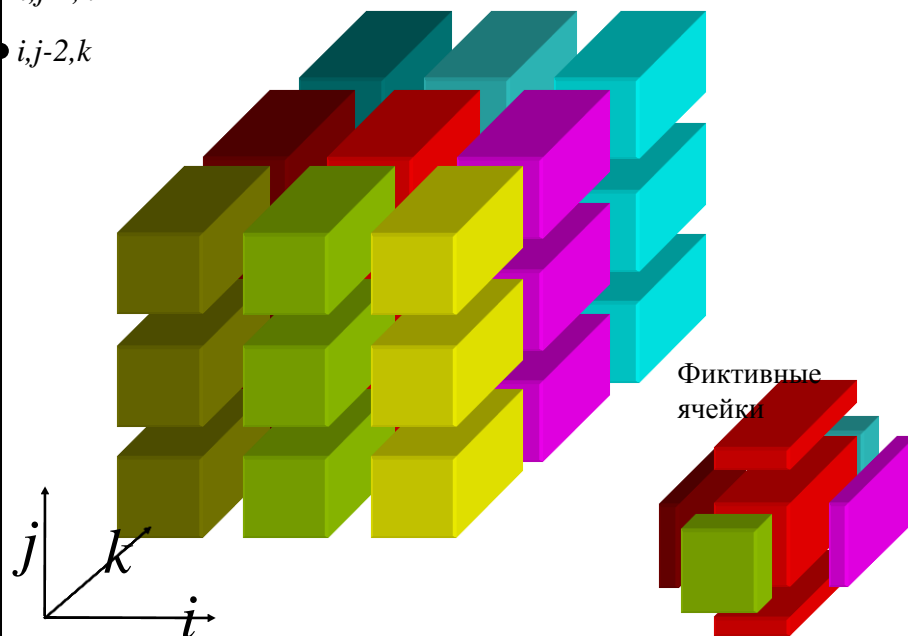


2D-декомпозиция разбиение

блочное

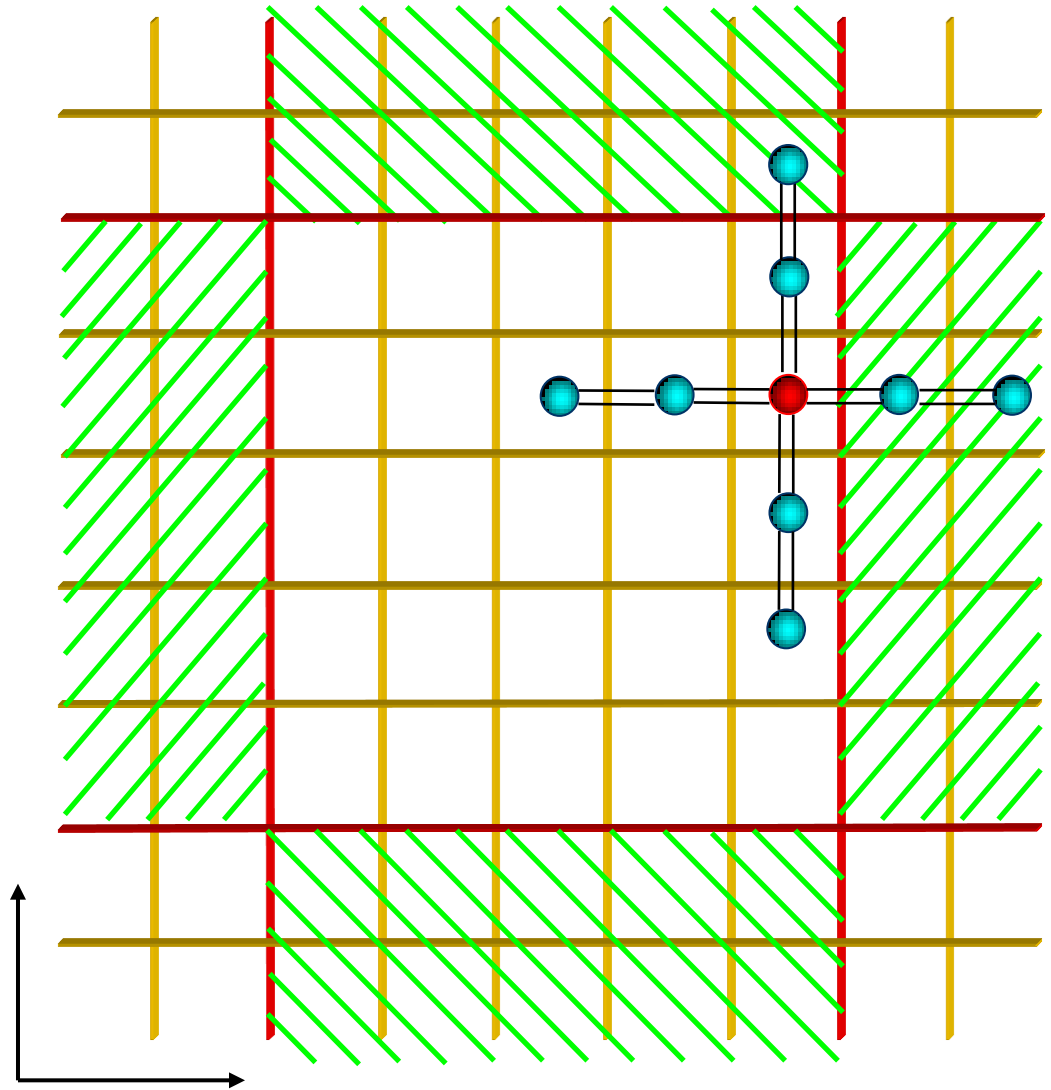


3D-декомпозиция



Планирование коммуникаций

Данные распределены, следующий этап построения параллельной программы – это планирование коммуникаций. В силу используемого шаблона схемы, для вычисления очередного приближения в приграничных узлах подобласти необходимо знать значения с соседнего процессора.



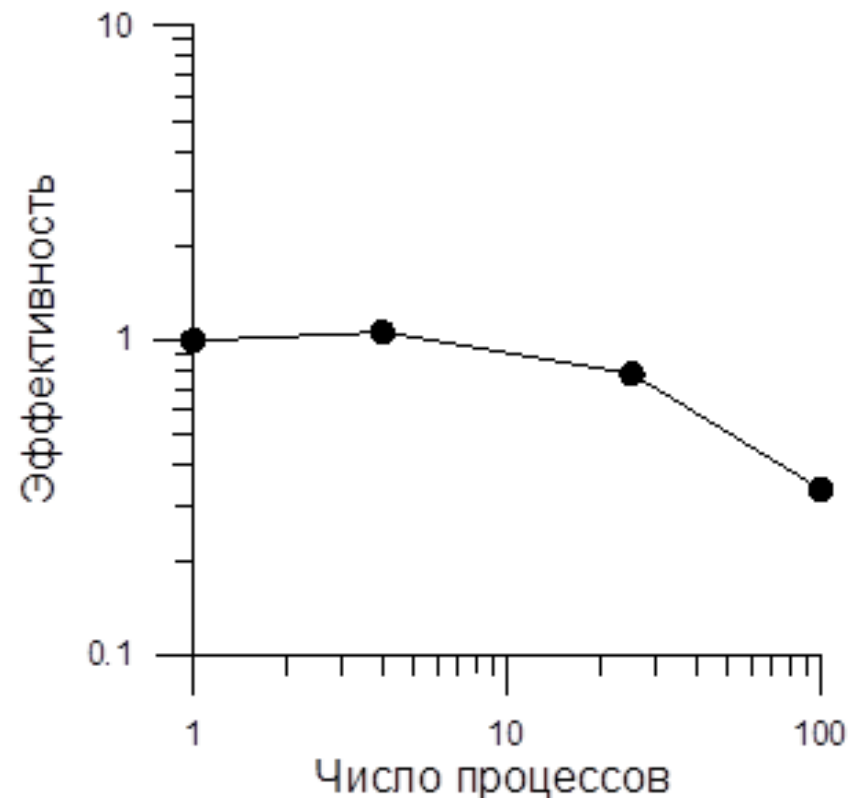
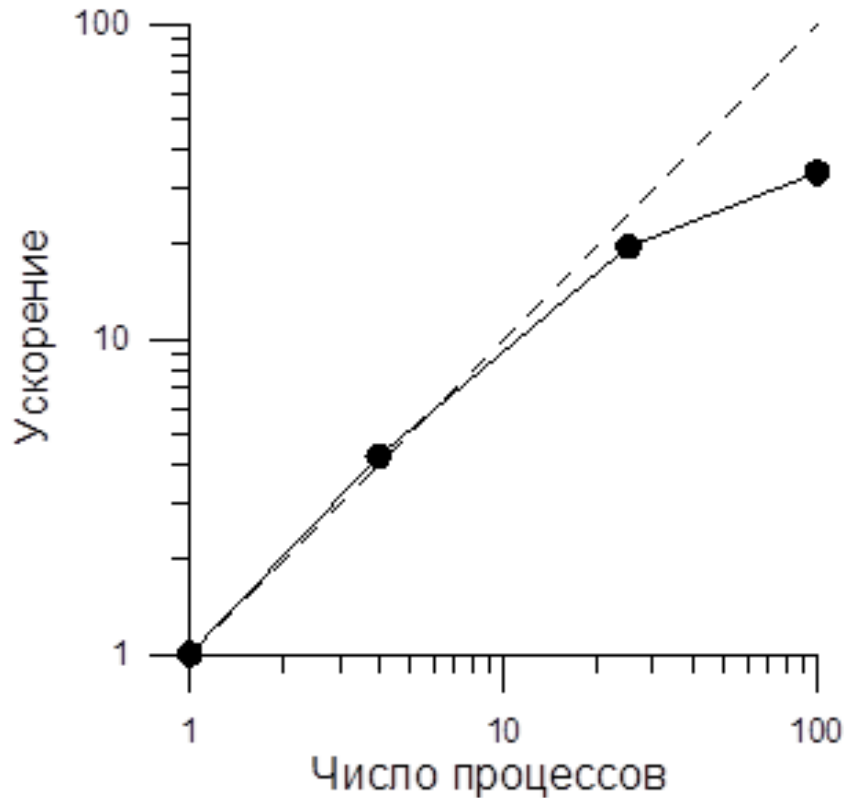
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КЛАСТЕР ТГУ СУВЕРΙΑ



Суперкомпьютер «СКИФ Cyberia» состоит из 640 узлов на базе 1 280 шестиядерных и двухъядерных процессоров Intel® Xeon® серий 5150 и 5670. Используется Mellanox Infiniband QDR 40 Гб/сек с задержкой до 2,5 мкс. Имеется 5 узлов/10 28-ядерных процессоров Intel Xeon E5-2695V3 и 256 Гб ОЗУ, 10 ускорителей Tesla K80.

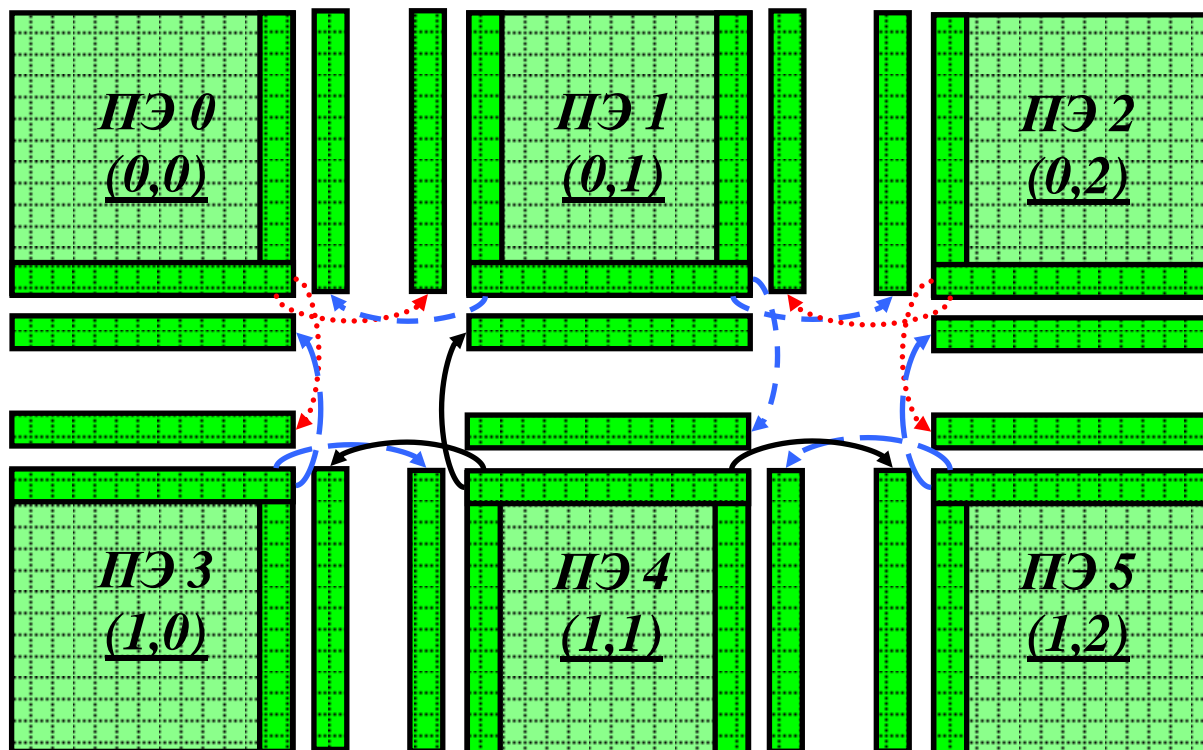
Для разработки параллельной программы первоначально использовалась технология Message Passing Interface.

Ускорение и эффективность программы TSU-NM3



Сетка 50x50x30, шаг сетки по горизонтали 1км
Ускорение программы в 30-40 раз.

Технология опережающей рассылки



Результаты показывают, что использование неблокирующих операций обмена сообщениями между вычислительными узлами позволяет уменьшить время работы программы на 2-8 %.

Технология OpenMP

Компиляция: `pgf90 -fast -mp -Minfo -Mpreprocess`

Export `OMP_NUM_THREADS=1,4,8,12,16`

Время счета: **Xeon 5675 3,07 GHz 2CPU with 6Cores**

Threads=	1	4	8	12	16
Time(s) =	149	39	22	15,4	16,6
SpeedUp=	1,0	3,8	6,8	9,7	9,0

Ускорение с небольшим изменением последовательной программы почти в 10 раз.

Технология OpenACC

Компиляция: pgf90 -acc -fast -ta=NVIDIA -Minfo

Время счета: NVIDIA GTX1070+Xeon 5675 3,07 GHz
2CPU with 6Cores

Размер сетки	128x128x128	256x256x256
Последовательная	144	1759
OpenMP (12T)	15,1 (9,5)	110,8 (15,9)
OpenACC	1,6 (90)	13,0 (135,3)

Ускорение OMP-версии программы в 9-15 раз,
ускорение ACC-версии программы в 90-135 раз.

Технология MPI+OpenMP

Компиляция: `mpif90 -O2 -openmp`

Запуск на счет `ompirun -np xxx`

Написан скрипт `ompirun`, когда при расчете используются все ядра каждого из `xxx` узлов (`ppn=4`)

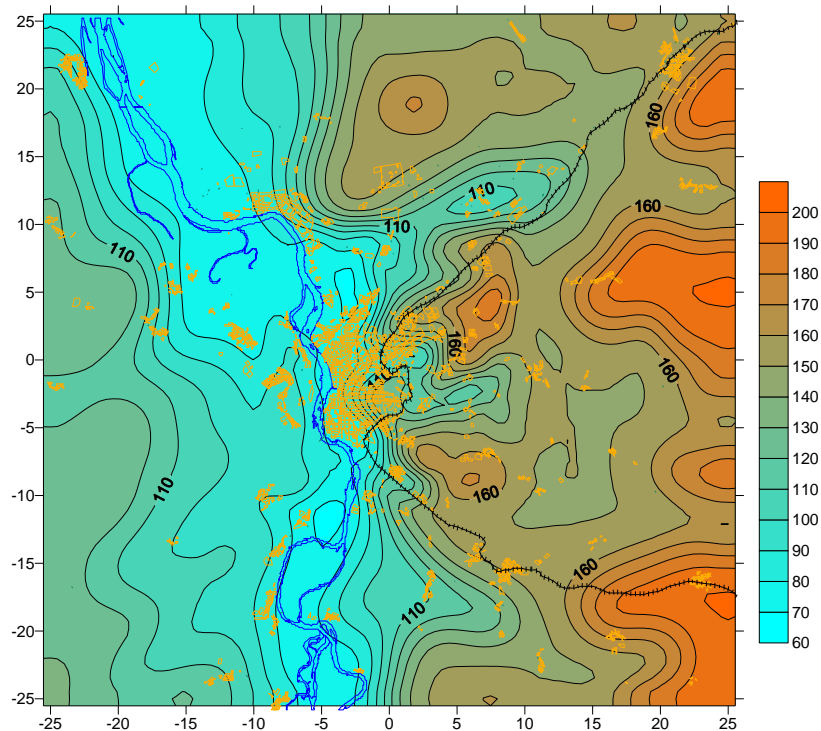
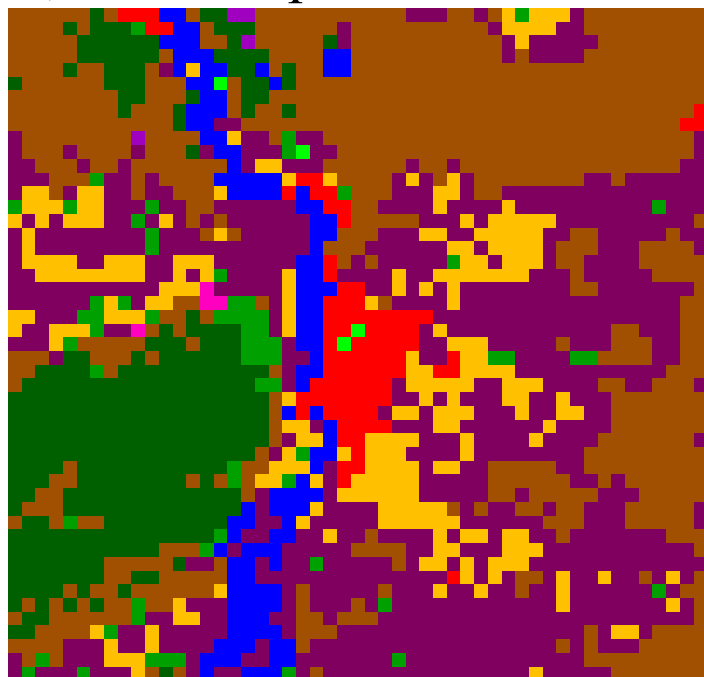
Время счета: **Xeon 5150 2,66 GHz 2CPU with 2Cores**

CPU(s)	1	1	4
Threads=	1	4	4
Time(s) =	118,6	32,4	10,0
SpeedUp=	1,0	3,7	11,9

Совместное применение двух технологий MPI+OpenMP не дает дополнительного ускорения.

Условия применения

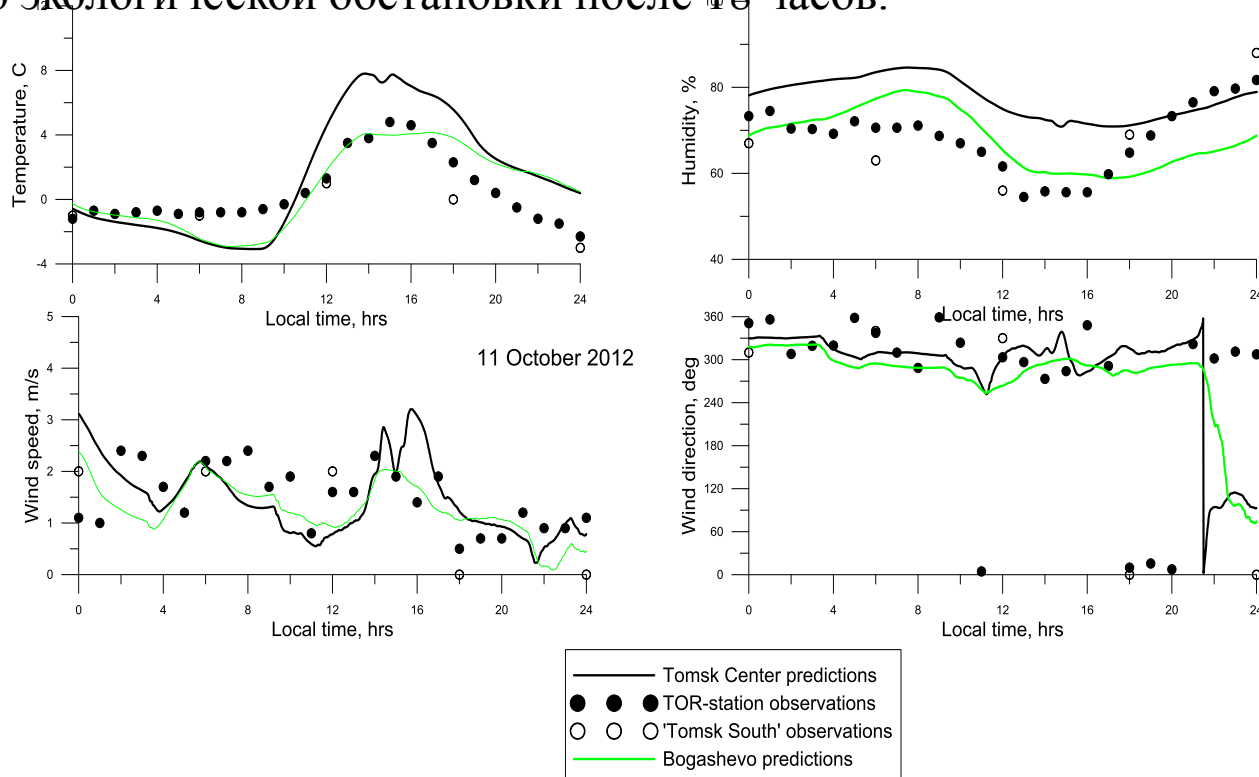
- Вычислительный комплекс был применен к исследованию штилевых метеорологических условий и их влияния на качество воздуха в Томске. Были выбраны следующие даты: 11, 14, 15 октября 2012 года.



Вода, Незначительная растительность, Пашня, Лиственный лес, Смешанный лес, Вечнозеленый лес, Городская застройка;

Результаты расчетов

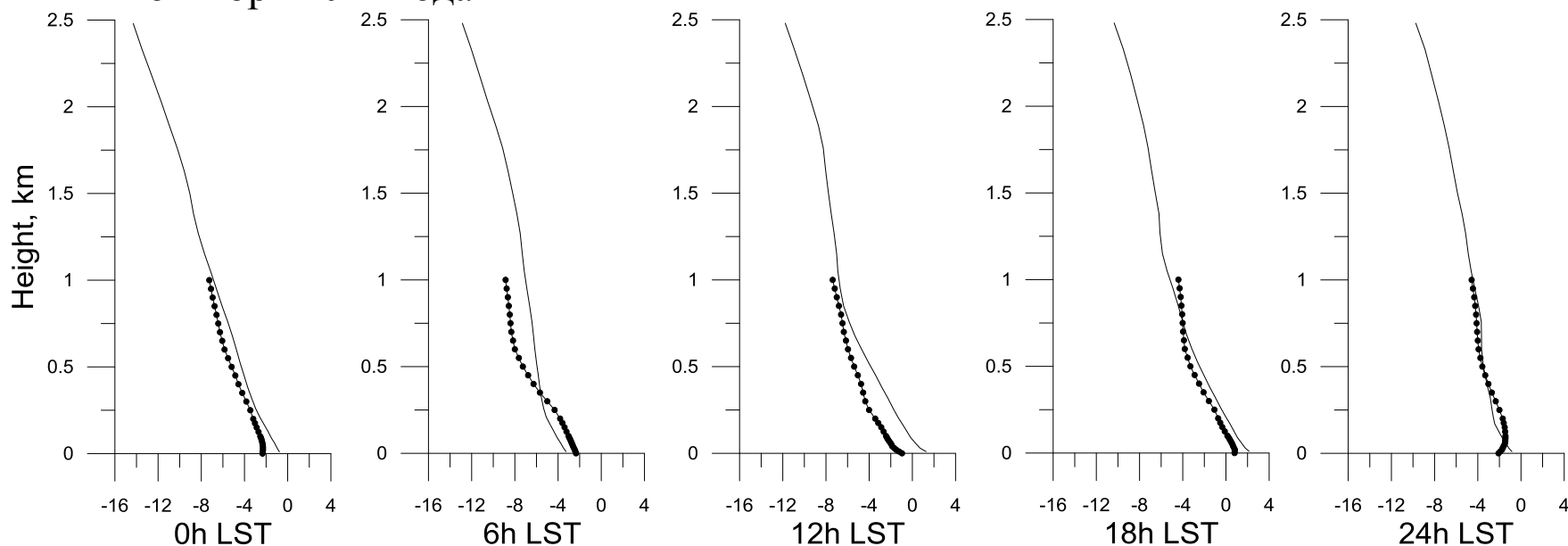
Судя по наблюдениям (<http://meteo.infospace.ru>) 11 октября 2012 года температура воздуха в Томске колебалась около 0 градусов Цельсия, направление ветра было северо-западным, сила ветра около 2м/с с образованием безоблачных штилевых условий в вечернее и ночное время суток. Стратификация атмосферы способствовала ухудшению экологической обстановки после 18 часов.



Изменение во времени температуры и влажности на высоте 2м и силы и направления ветра на высоте 10м для района расположения ТОР-станции ИОА СО РАН в Томске.

Результаты расчетов

Изменение вертикального профиля температуры в районе центральной части Томска (линии – расчет) и в районе аэропорта Богашево (значки – измерения) 11 октября 2012 года



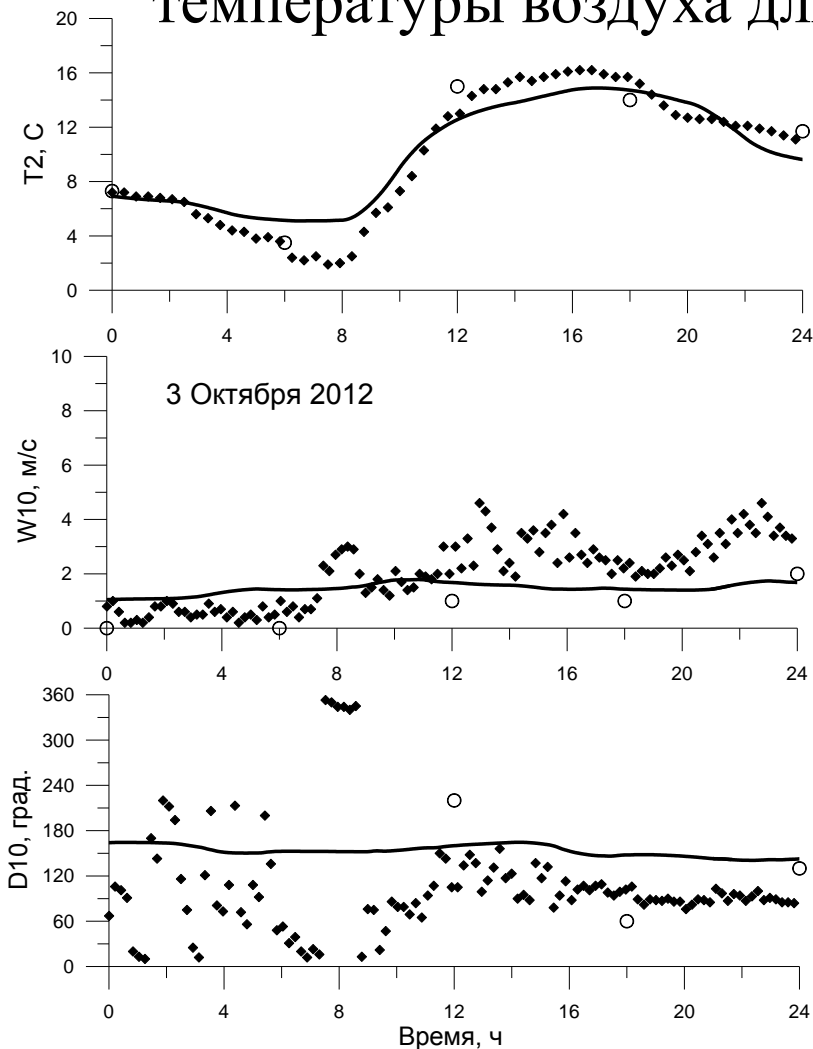
Температурный профилемер ИМКЭС СО РАН МТР-5 позволяет отображать термическую структуру нижнего 1000-метрового слоя атмосферы и получать ее временную динамику с дискретностью по вертикальной координате 10-50 м. и периодичностью 5 мин.



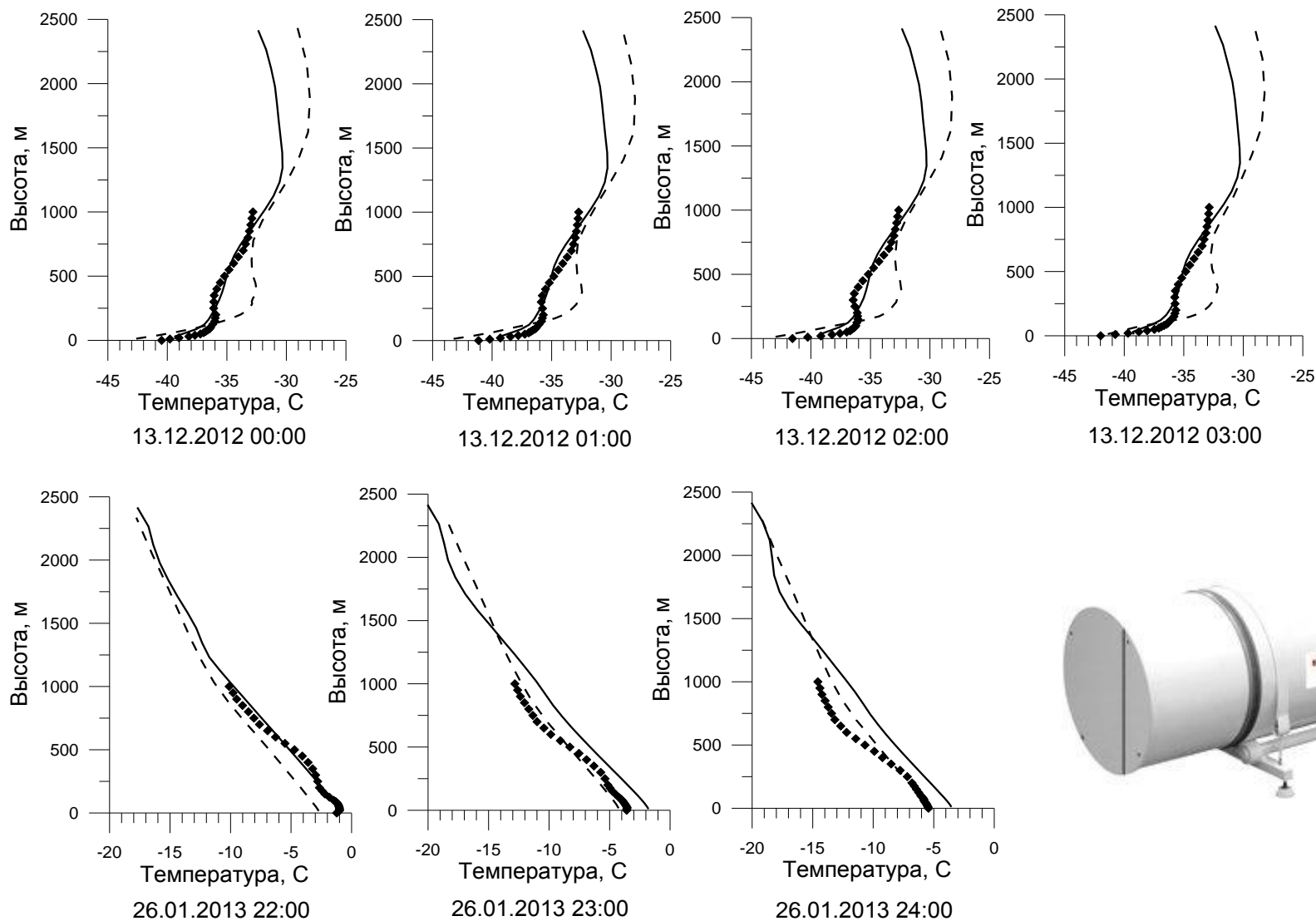
Аэропорт Богашево



Рассчитанные по модели и измеренные автоматической метеостанцией WXT520 значения приземного ветра и температуры воздуха для района аэропорта Богашево

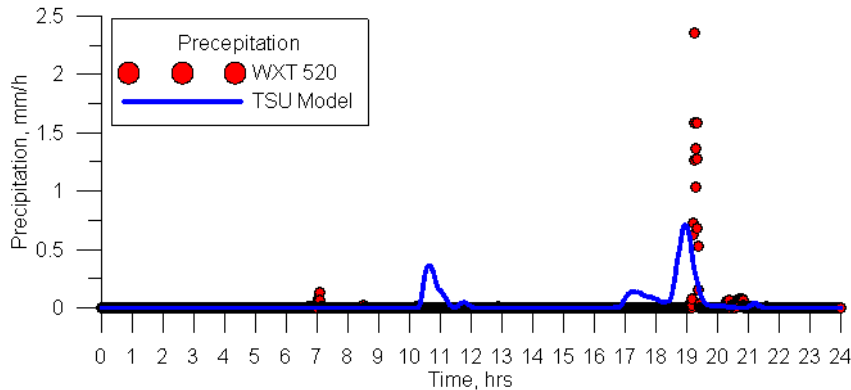


- В течение суток происходило увеличение облачности от 0 – 9 баллов, давление понизилось с 1019 гПа до 1009 г Па.
- Ветер при небольшой скорости от штиля до 2 м/с был неустойчив, но преимущественно с северной составляющей.
- Наблюдался хорошо выраженный суточный ход температуры воздуха (амплитуда составила 11,5 °С).
- Выпадение осадков в этот день не отмечалось.
- К концу анализируемых суток через Томск прошел теплый фронт

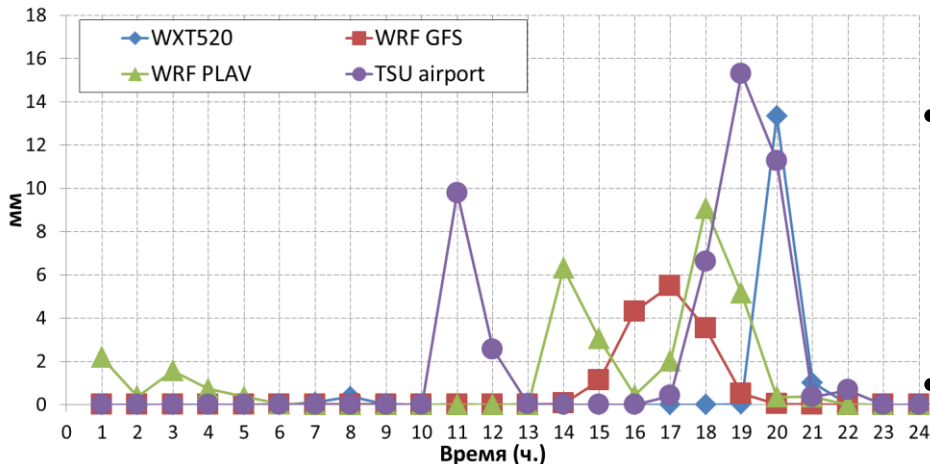


Вертикальный профиль температуры над аэропортом Богашево во время сильного похолодания (а) и оттепели (б). Значки – измеренные значения, сплошная линия – расчет по модели ТГУ, штриховая – расчет по модели Weather Research & Forecasting (WRF NCAR)

Графики интенсивности дождевых осадков, выпавших во время грозы 27 августа 2012 года в районе аэропорта Богашево



Интенсивность дождевых осадков, выпавших во время грозы 27.08.2012 в районе аэропорта Богашево



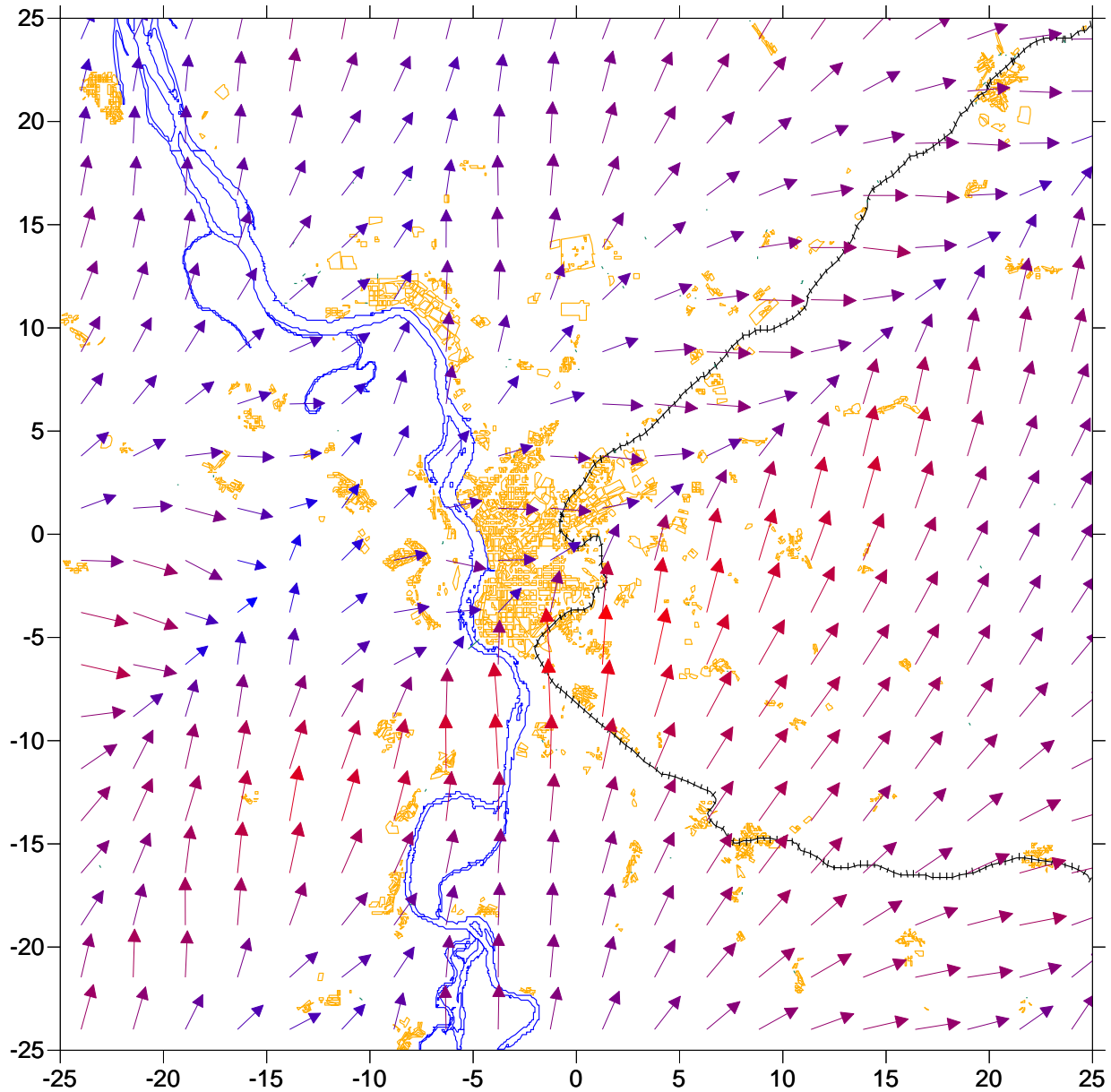
Накопленные за час дождевые осадки, выпавшие во время грозы 27.08.2012 в районе аэропорта Богашево

- В соответствии с информацией, представленной на сайте Гидрометцентра (meteo.infospace.ru), 27 августа 2012 в течение всего дня наблюдалась облачность 10 баллов, штилевые условия, температура воздуха в течение суток изменялась от 11 до 16 градусов Цельсия.
- В 18 часов местного времени в городе Томск была зафиксирована гроза (которую предсказывали используемые мезомасштабные модели).
- Для WRF использовалась параметризация микрофизики влаги WSM6 (шесть фазовых состояний влаги)

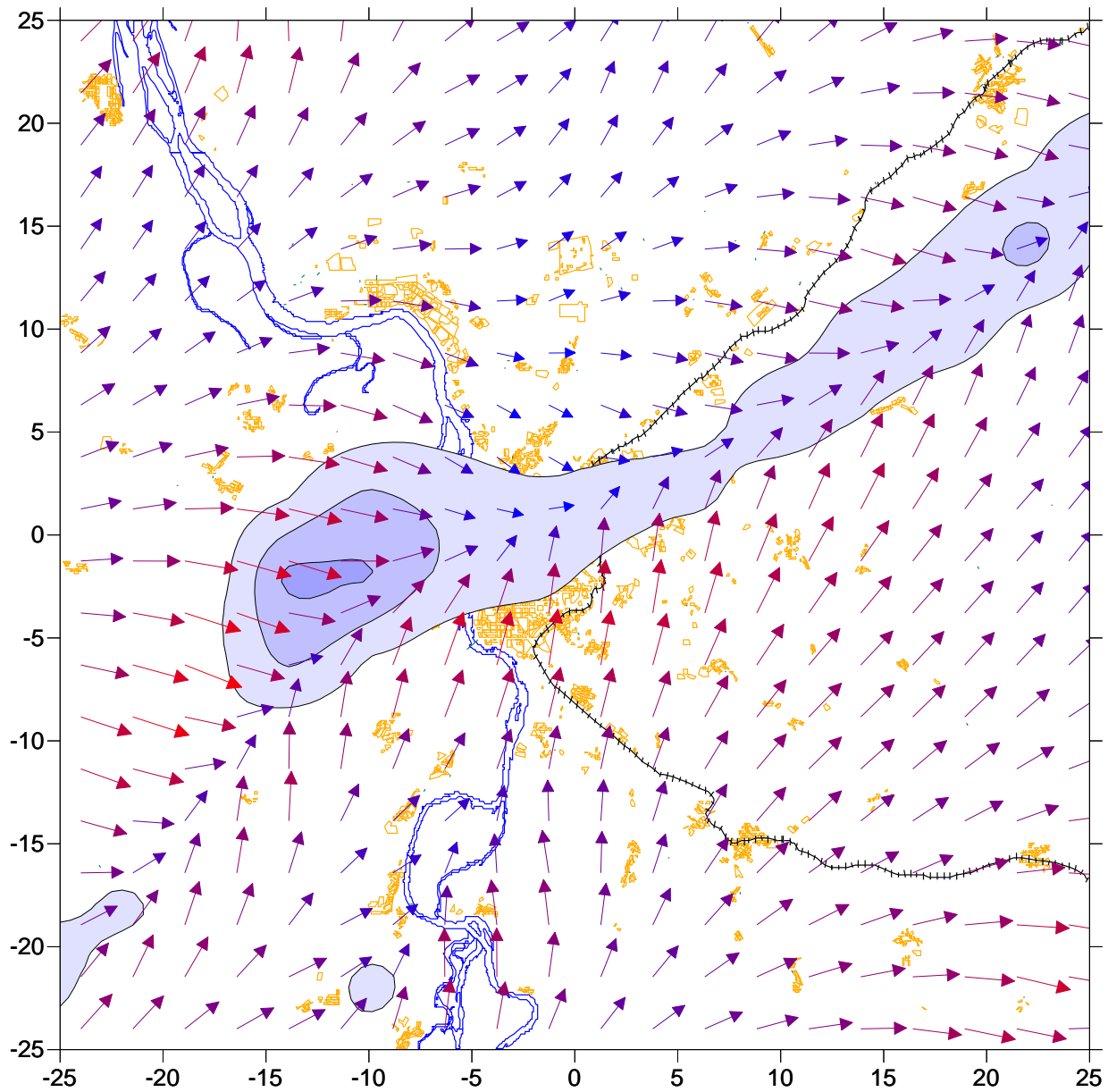
Информация с сайта meteo.infospace.ru

27.08.2012 - Наблюдения в течение суток (атмосфера)

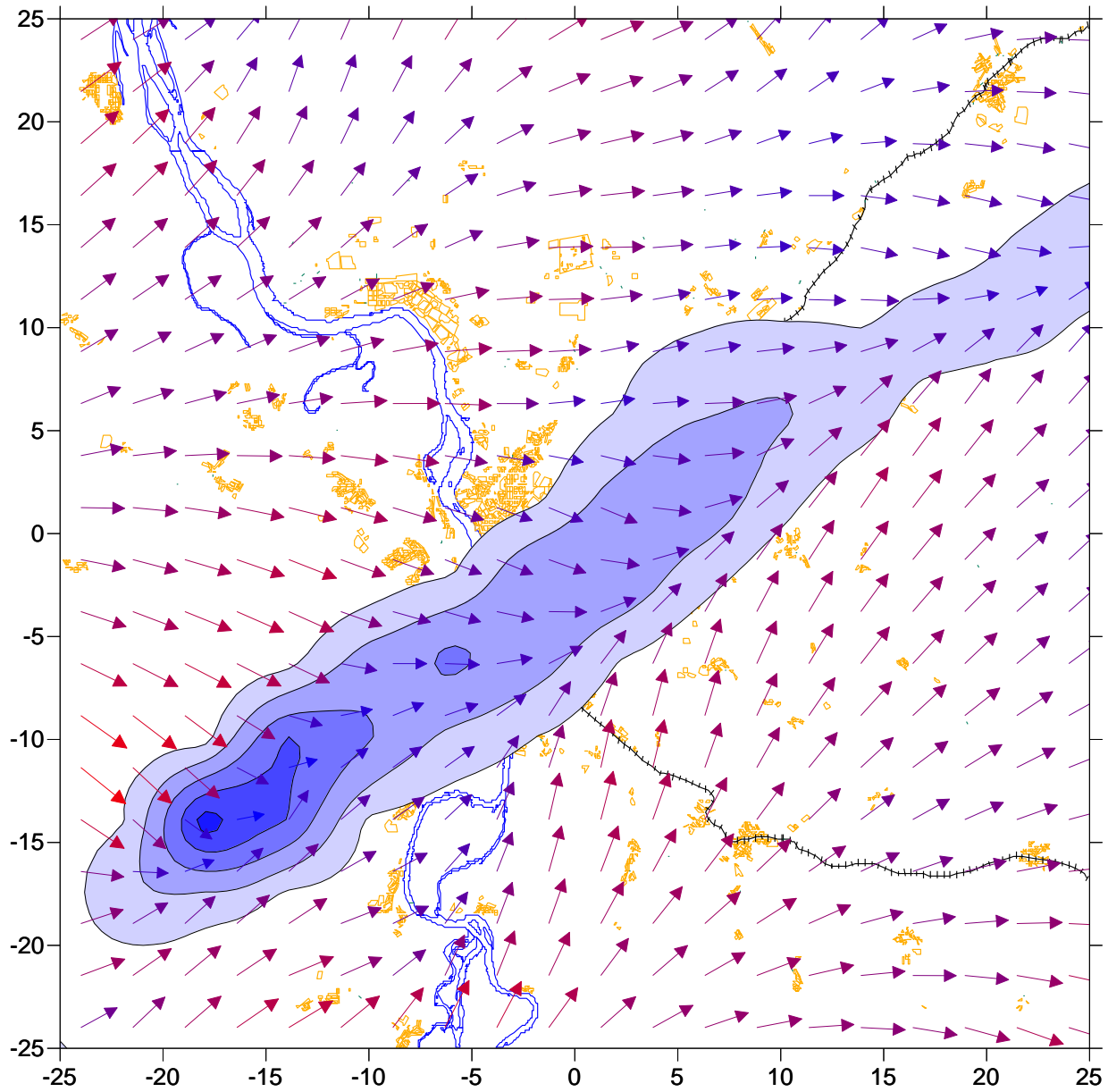
Время мест. / GMT	Темп. воздуха	Давление ур. моря мм (гПа)	Давление на 139 м мм (гПа)	Отн. влажность	Точка росы	Ветер, м/с напр., сила (порывы)	Видимость	Облачность	Ниж.гран. облачности высота (форма)	Явления (код КН-01)
00:00 / 18:00 ⁻¹	+11.1°C	754 (1005)	742 (989)	99%	+10.9°C	СВ 1 (60°) - (...)	20.0 км	6 балл.	800 м (...)	(02) Облачность без изменений
06:00 / 00:00	+12.2°C	752 (1003)	740 (987)	96%	+11.6°C	0 (...)	20.0 км	10 балл.	250 м (...)	(80) Небольшой ливневый дождь
12:00 / 06:00	+16.0°C	752 (1003)	740 (987)	86%	+13.7°C	ЮВ 2 (120°) - (...)	20.0 км	10 балл.	800 м (...)	(02) Облачность без изменений
18:00 / 12:00	+16.4°C	753 (1004)	741 (988)	77%	+12.4°C	0 (...)	20.0 км	10 балл.	800 м (...)	(95) Гроза, дождь (или снег)
Среднее	+13.9°C	753 (1004)	741 (987)	90%	...	1 м/с	...	9 балл.	...	



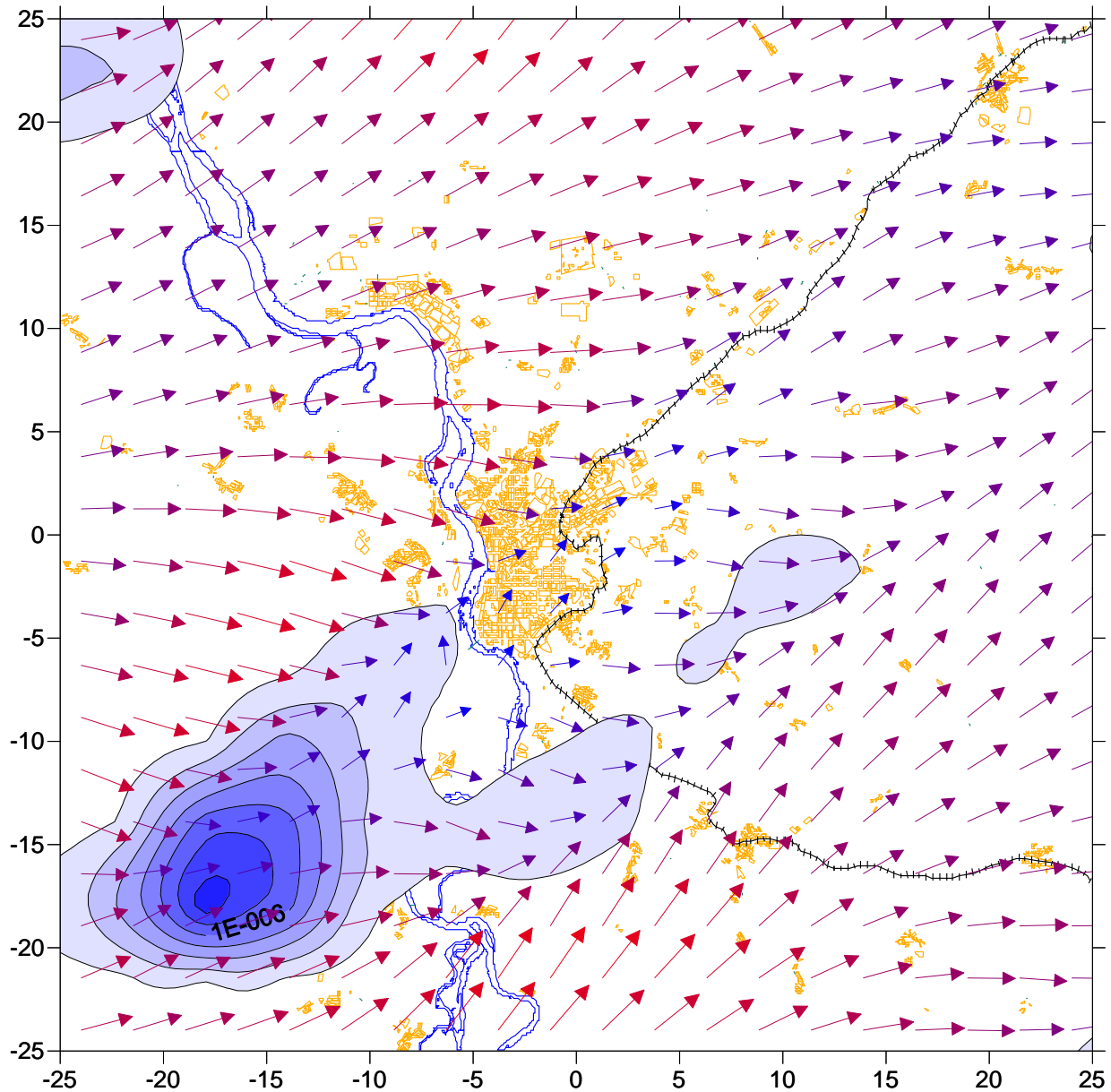
Time -16:00 LST



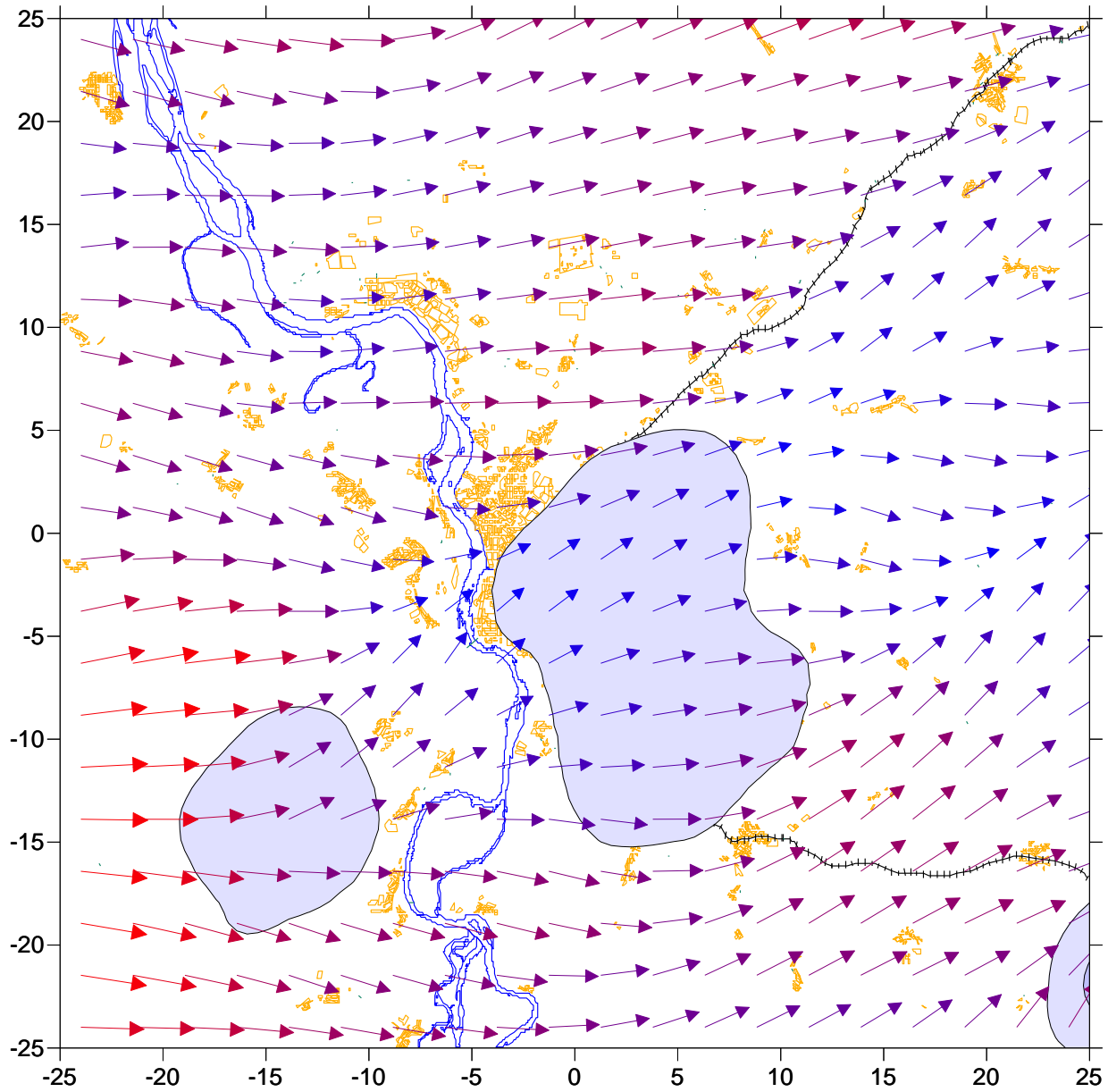
Time -17:00 LST



Time -18:00 LST



Time -19:00 LST



Time -20:00 LST

Основные уравнения ММ

JOURNAL OF THE KOREAN METEOROLOGICAL SOCIETY, 42, 2, 2006, p. 129-151

The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6)

Song-You Hong and Jeong-Ock Jade Lim*

Global Environment Laboratory, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

(Manuscript received 5 April 2006; in final form 28 April 2006)

Схема WSM6, используемая в модели WRF, в которой рассматриваются шесть классов состояния воды в атмосфере: водяной пар, облачная влага, дождь, снег, ледяные кристаллы, град. Эта схема более эффективна для моделирования с высоким разрешением (примерно 5 км). Учитывает разность падения облачных элементов и поэтому позволяет моделировать рост капель или кристаллов за счет их захвата и слияния.

Основные уравнения ММ

Основные уравнения схемы WSM6 имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \rho q_V}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i q_V}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_H \frac{\partial q_V}{\partial x_i} \right) + \rho S_V; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho q_C}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i q_C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_H \frac{\partial q_C}{\partial x_i} \right) + \rho S_C; \quad (2)$$

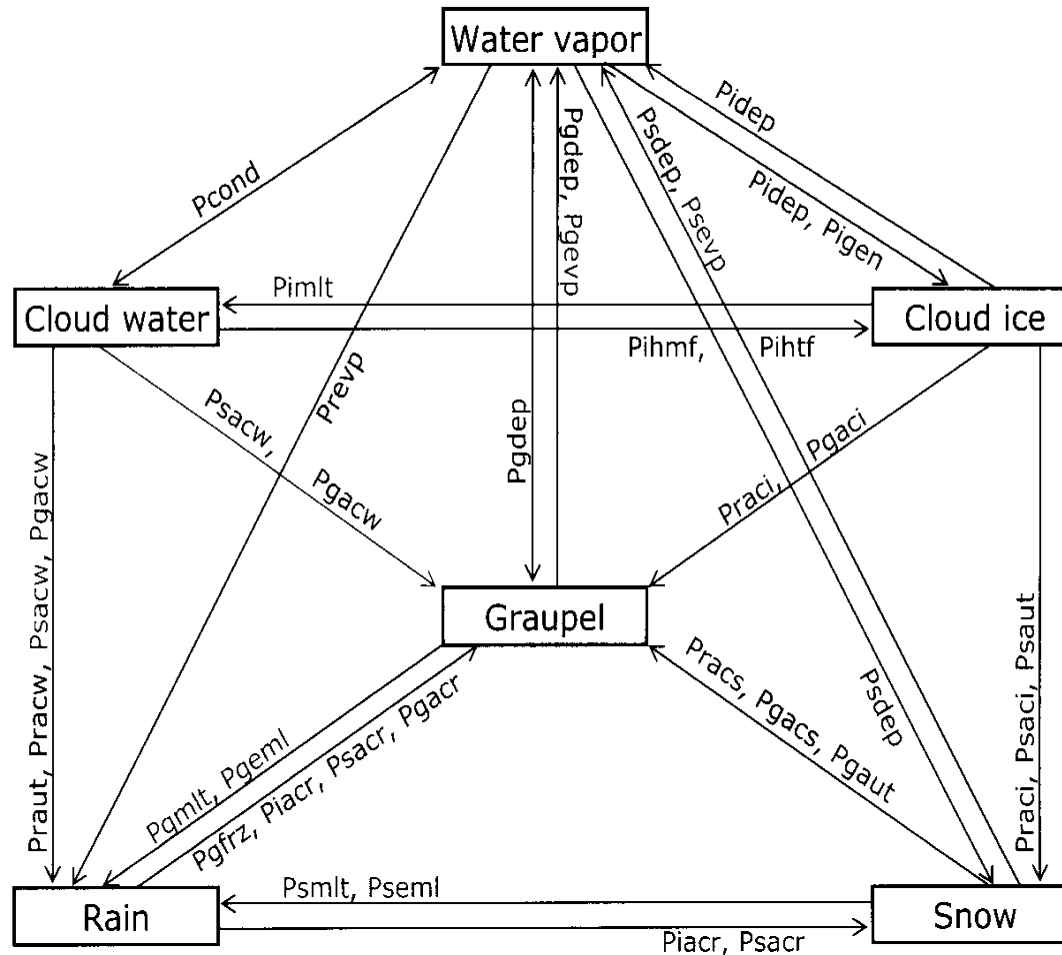
$$\frac{\partial \rho q_R}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i q_R}{\partial x_i} = - \frac{\partial \rho V_R q_R}{\partial x_3} + \rho S_R; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho q_S}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i q_S}{\partial x_i} = - \frac{\partial \rho V_S q_S}{\partial x_3} + \rho S_S; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho q_I}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i q_I}{\partial x_i} = - \frac{\partial \rho V_I q_I}{\partial x_3} + \rho S_I; \quad (5)$$

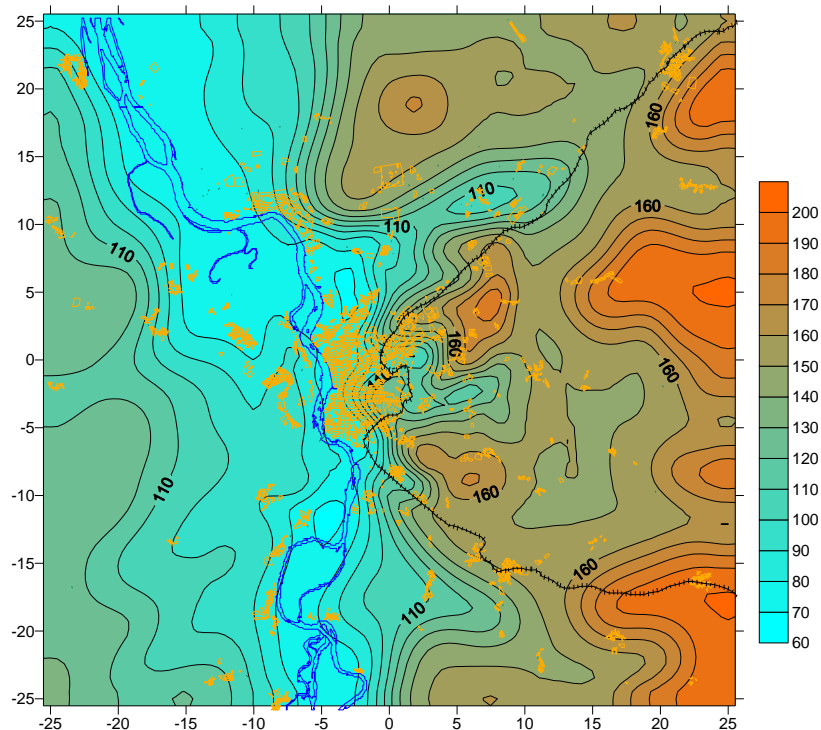
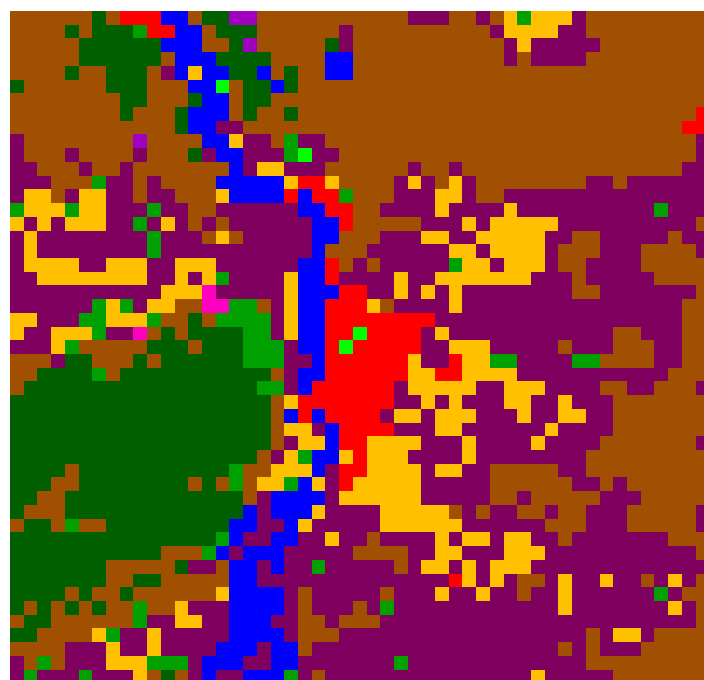
$$\frac{\partial \rho q_G}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i q_G}{\partial x_i} = - \frac{\partial \rho V_G q_G}{\partial x_3} + \rho S_G. \quad (6)$$

Диаграмма микрофизических процессов влаги в схеме WSM6



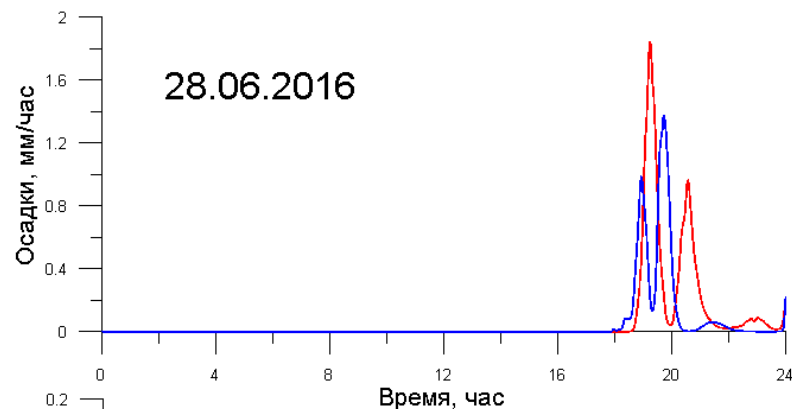
Условия применения

- Вычислительный комплекс был применен к исследованию прогнозирования осадков в Томске. Были выбраны следующие даты: 2012 год: 27.08.; 2016 год: 28.06., 11.07., 25.11; 2017 год: 26.01., 25.06., 28.06., 5.08., 6.08., 29.12; 2018 год: 2.05., 8.05., 21.05.



Вода, Незначительная растительность, Пашня, Лиственный лес, Смешанный лес, Вечнозеленый лес, Городская застройка;

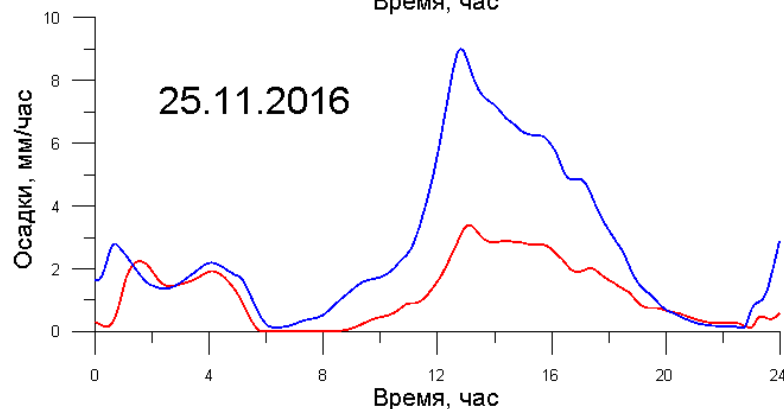
Расчеты и наблюдения, 2016 год



Наблюдаемые осадки (<http://rp5.ru>):
19 часов слабый ливень, дождь



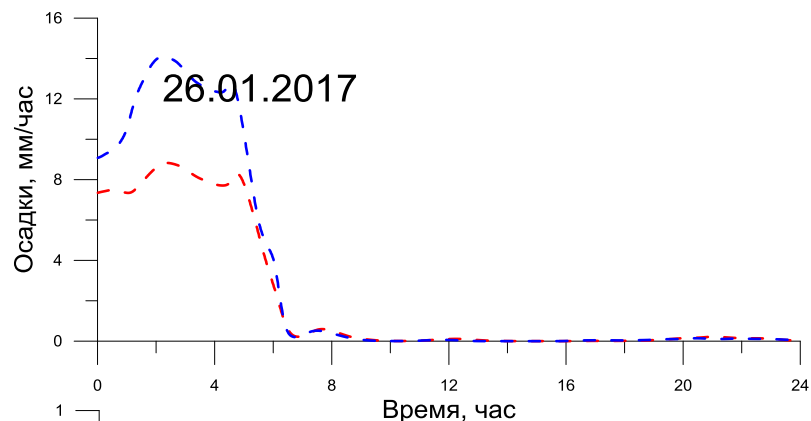
Наблюдаемые осадки (<http://rp5.ru>):
10-12 часов слабая гроза, дождь
21 час гроза



Наблюдаемые осадки (<http://rp5.ru>):
0-24 часов слабые ливни, снег
Усиление снегопада с 11:30 до 16:30

Синий цвет – осадки в Томске,
Красный цвет – осадки в Богашево.

Расчеты и наблюдения, 2017 год



Наблюдаемые осадки (<http://rp5.ru>):

0-10 часов слабый снег

14-15 часов слабый снег



Наблюдаемые осадки (<http://rp5.ru>):

8:30-13:30 часов слабые ливни, дождь

15-16:30 часов гроза

17-18:30 часов слабая гроза, дождь



Наблюдаемые осадки (<http://rp5.ru>):

1-1:30 часов слабые ливни, дождь

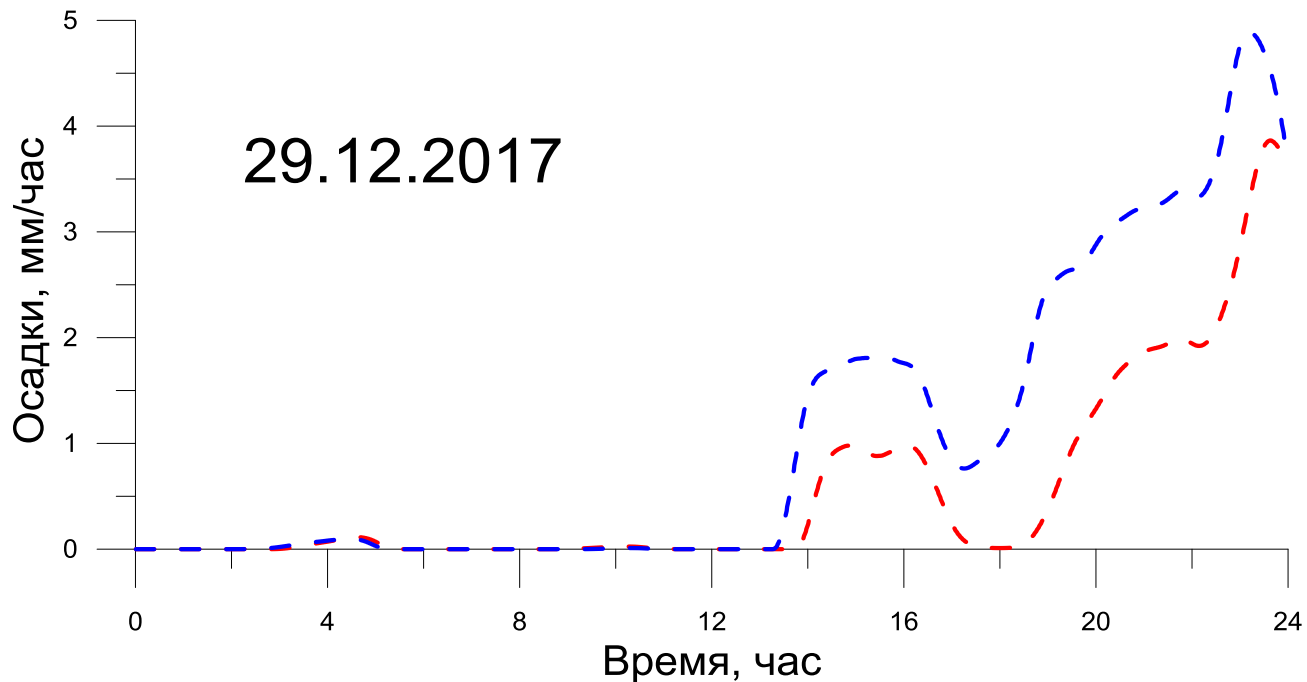
5:30-6 часов слабые ливни, дождь

11-12 часов слабые ливни, дождь

Синий цвет – осадки в Томске,

Красный цвет – осадки в Богашево.

Расчеты и наблюдения, 2017 год



Наблюдаемые осадки (<http://rp5.ru>):

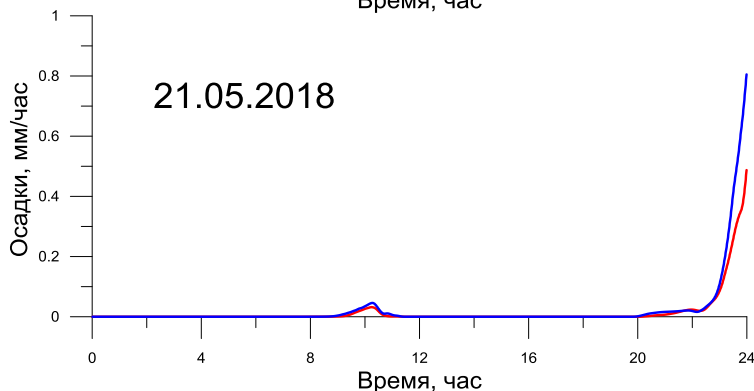
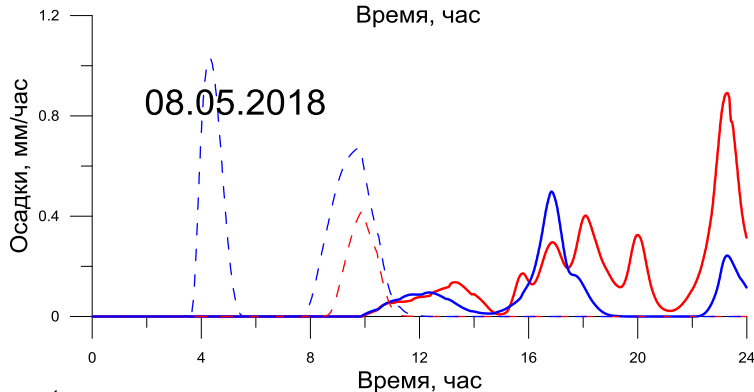
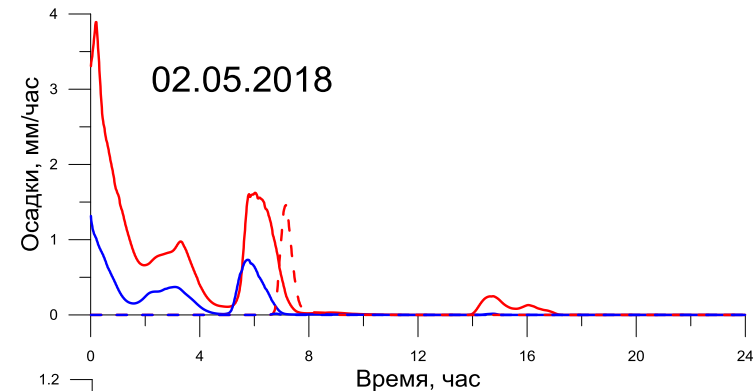
1-3 часов слабый снег, дождь

4-5 часов снег

5:30-8 часов слабый снег

10-21 часов слабый ливень, снег

Расчеты и наблюдения, 2018 год

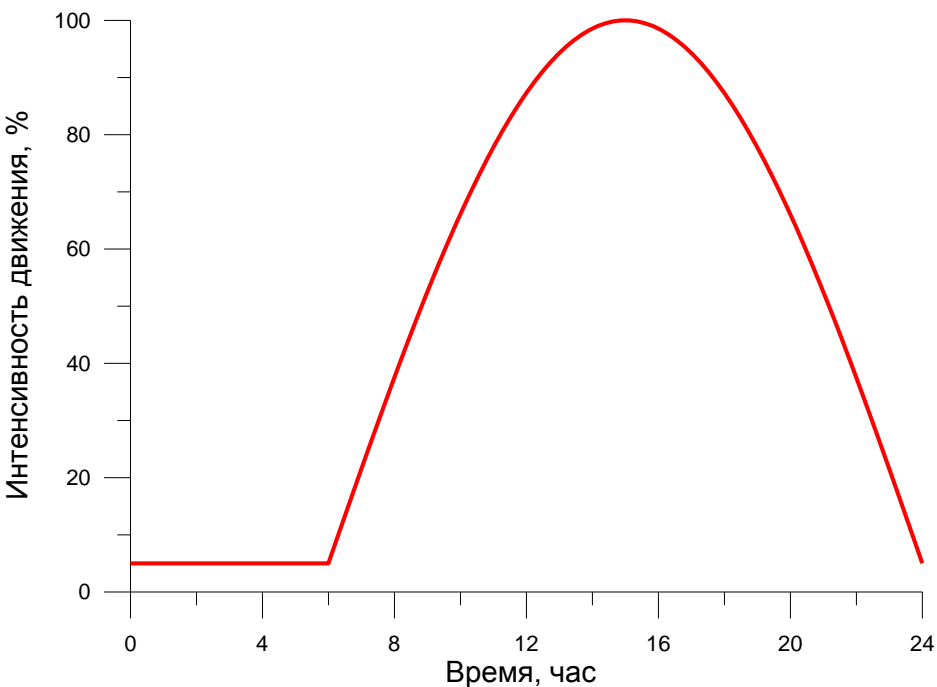


Наблюдаемые осадки (<http://rp5.ru>):
0-3 часов слабый ливень, дождь
3-6 часов сильный ливень, снег
6:30-8 часов слабый ливень, снег

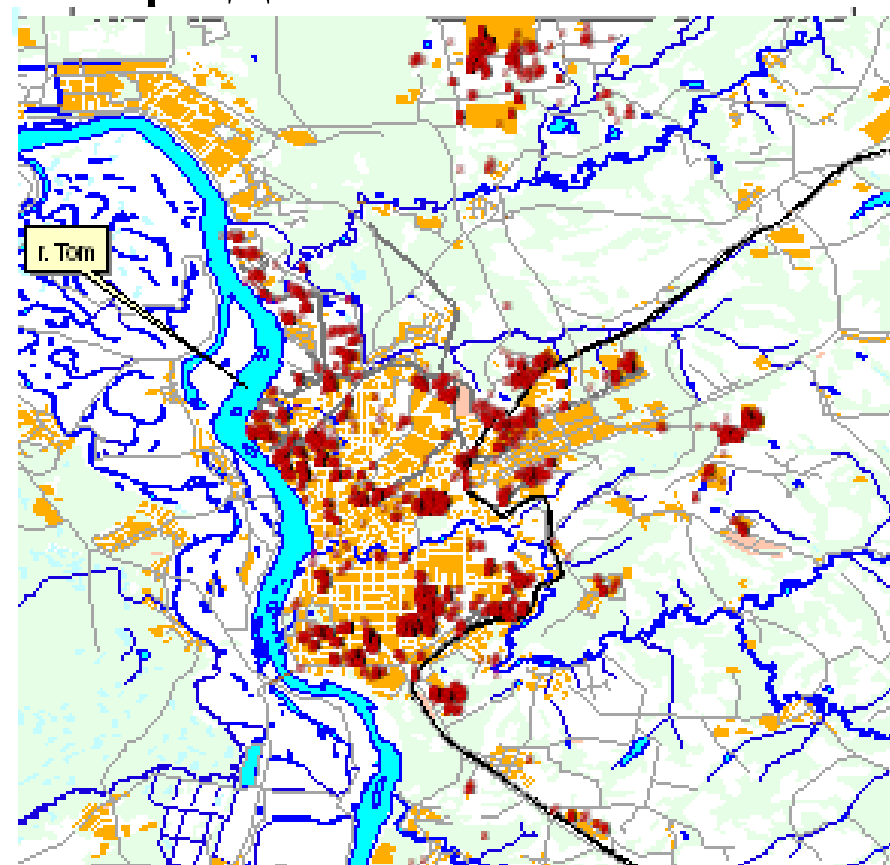
Наблюдаемые осадки (<http://rp5.ru>):
0-4 часов слабый ливень, снег
4:30-6 часов слабый дождь
6:30-9:30 часов слабый ливень, снег
10-17 часов слабый ливень, дождь
17-23 часов слабый ливень, снег

Наблюдаемые осадки (<http://rp5.ru>):
6:30-7 часов слабый ливень, дождь
13 часов сильный ливень, дождь
16:30-17 часов слабый ливень, дождь
22-24 часов слабый ливень, дождь

Численное моделирование образования вторичных загрязнителей и аэрозоля в атмосфере города

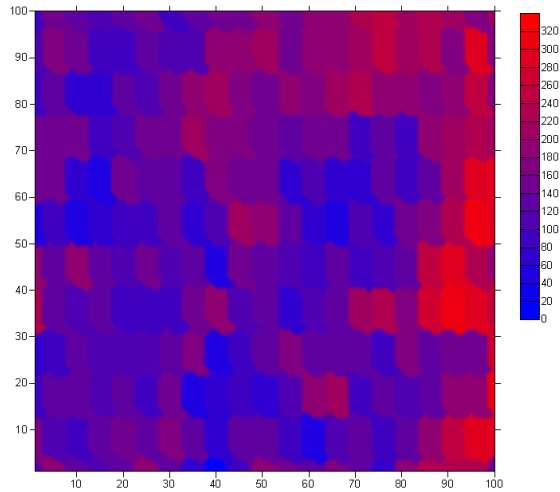


Временная зависимость интенсивности движения автомобильного транспорта в течении суток

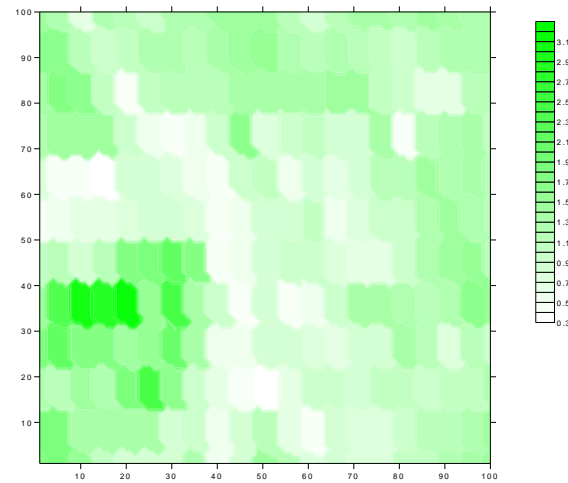


Стационарные источники загрязнения атмосферы в Томске и его окрестностях

Данные биогенной эмиссии

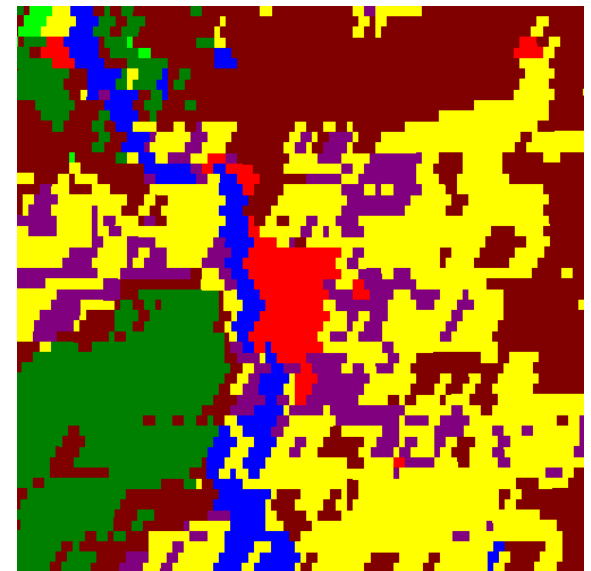


Isoprene Emission Factor
[мкг/с]



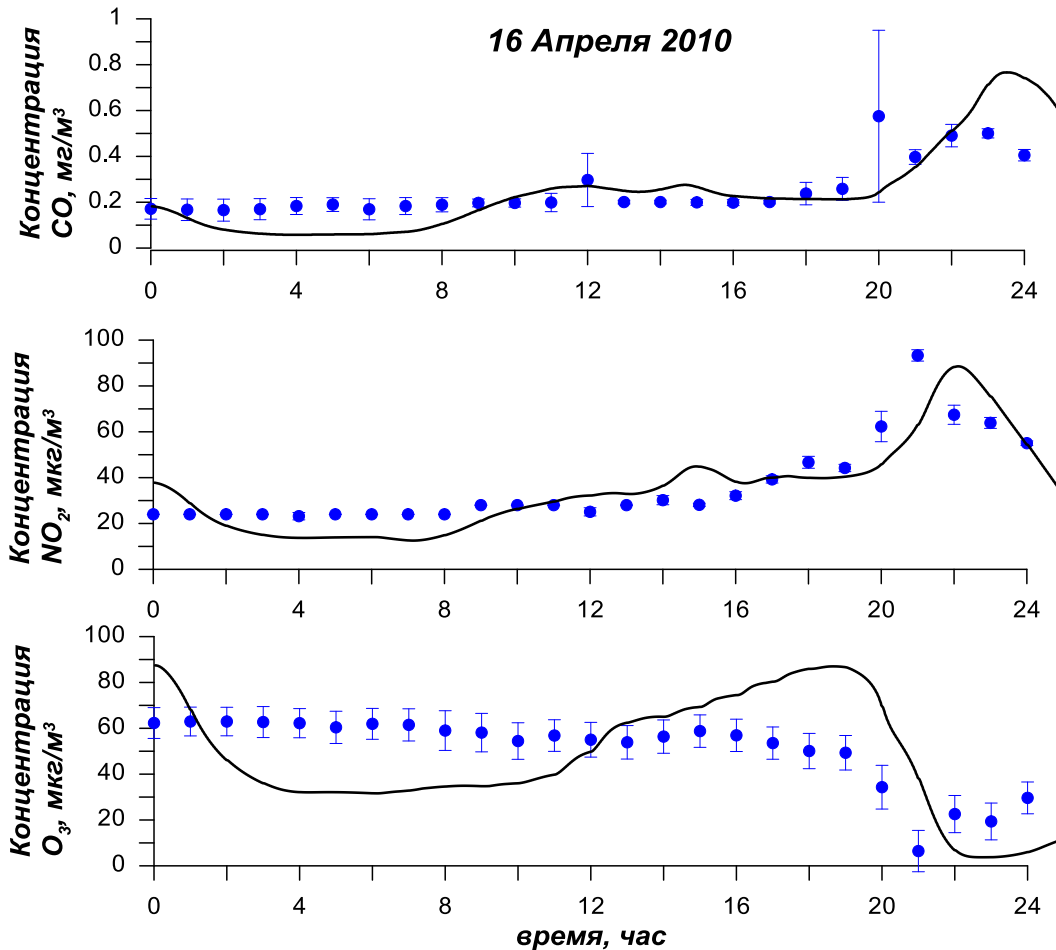
Leaf Area Index (Октябрь)

голубой – вода
фиолетовый - поля и пастбища
желтый – саванна
светло-зеленый – лиственный лес
коричневый – смешанный лес
темно-зеленый – хвойный лес
красный – город



Преобладающие категории землепользования

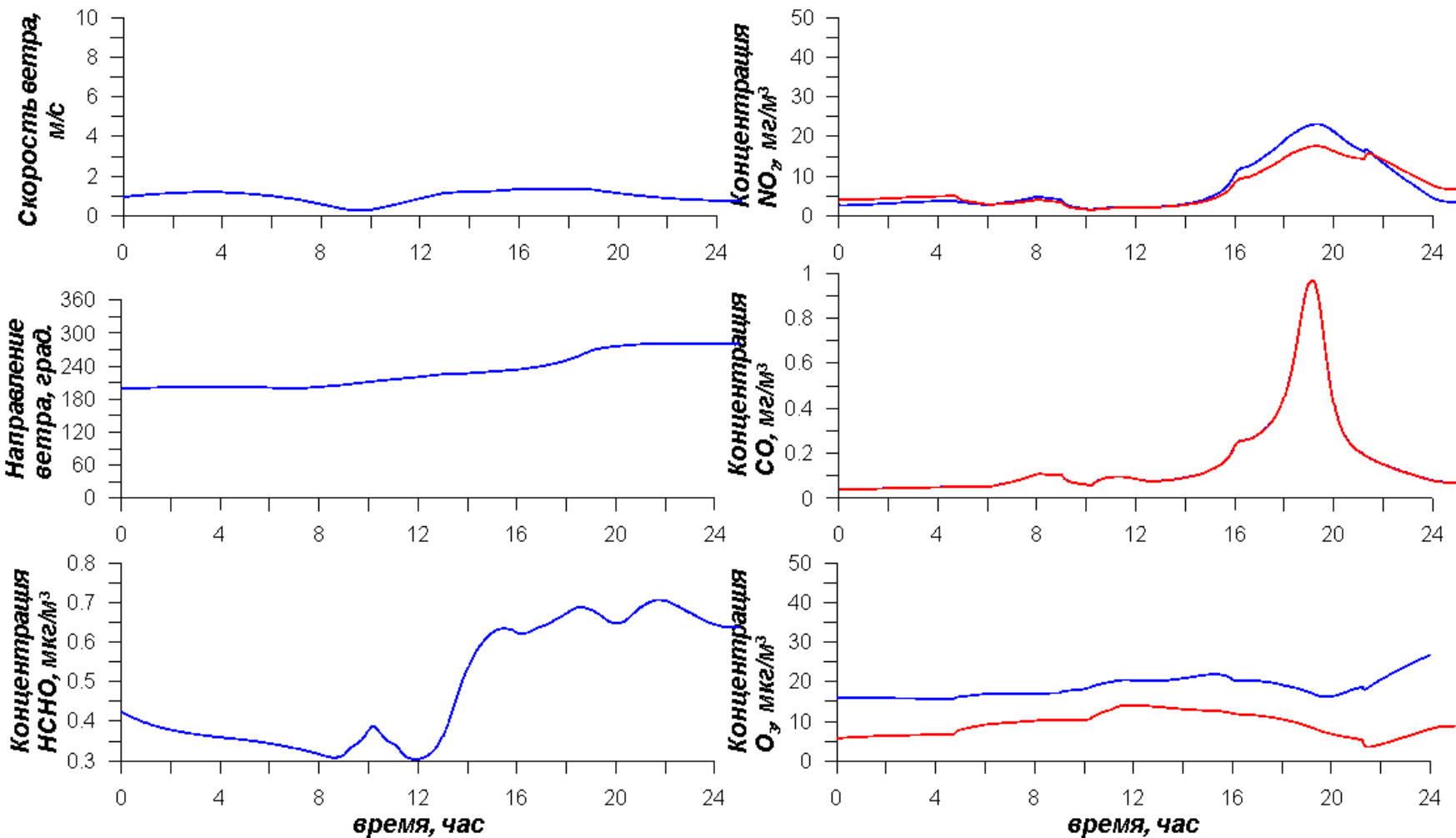
Сравнение результатов прогноза с измерениями



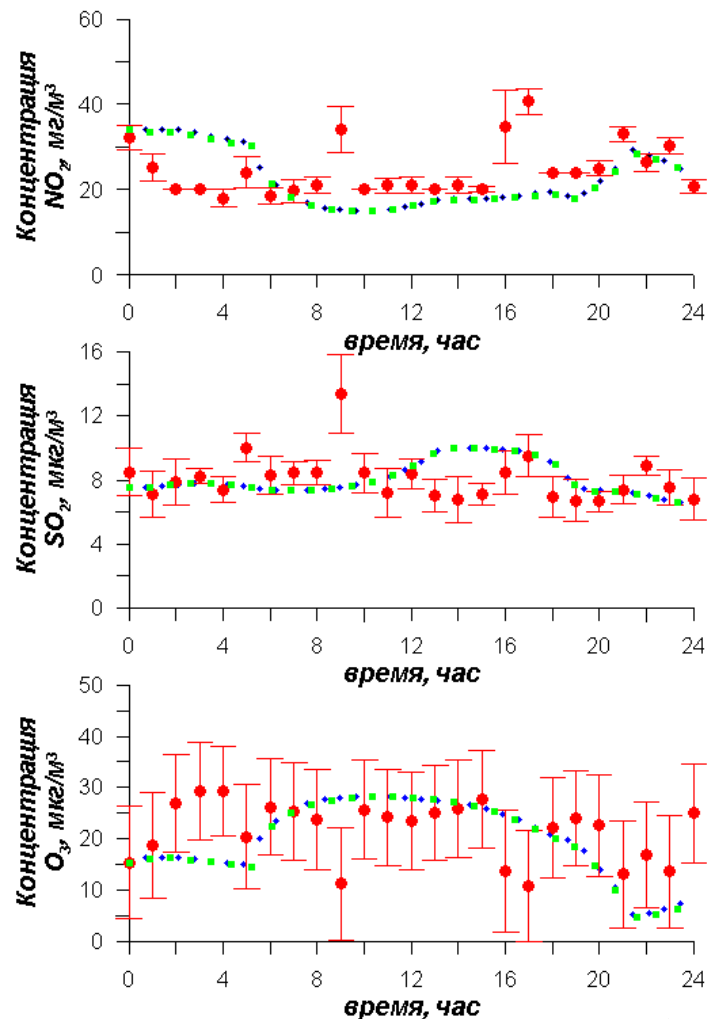
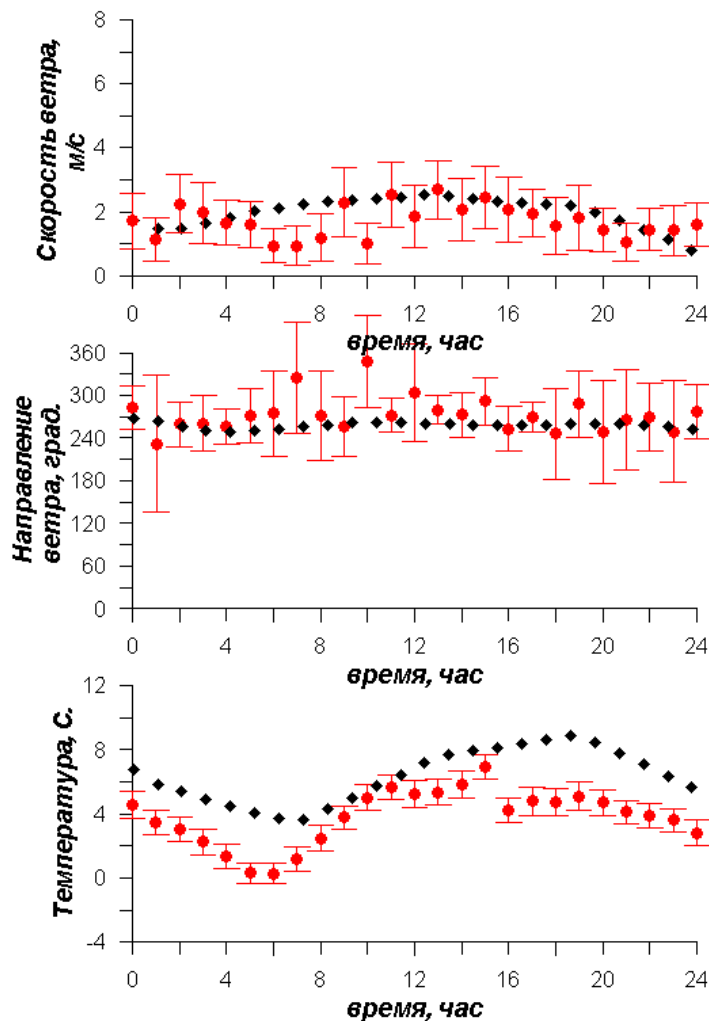
Сравнение
результатов
краткосрочного
численного
прогноза
на 16 апреля 2010 г.
с измерениями,
проведенными на
ТОР-станции
ИОА СО РАН

Влияние биогенных источников

21 июля 2009 г.

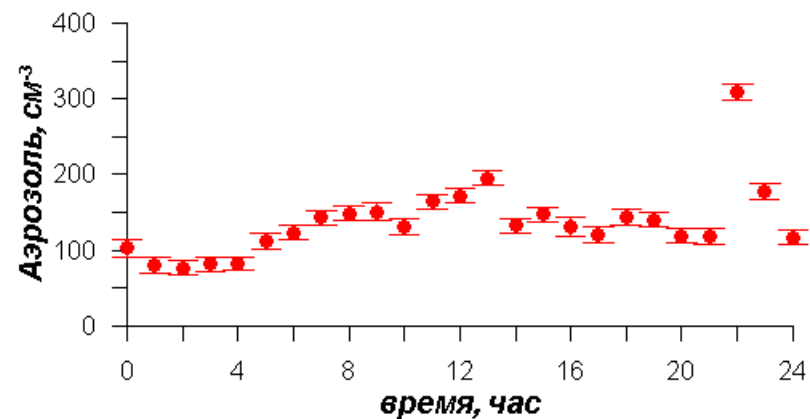
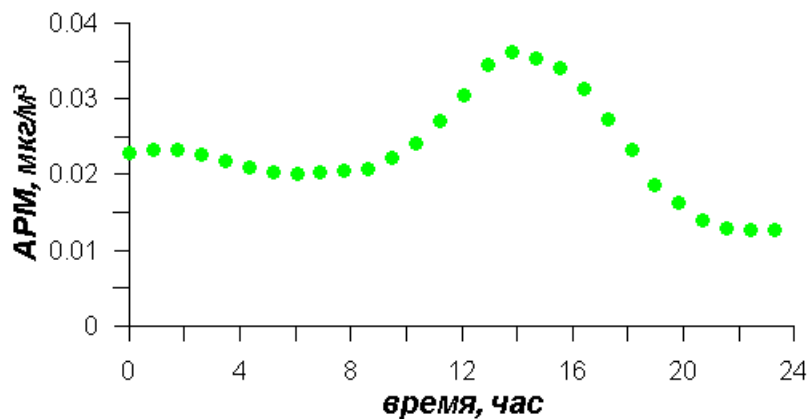


Результаты расчетов



Сравнение рассчитанных значений метеорологических параметров (◆) концентраций примесей по первоначальной (◆) и модифицированной (■) кинетическим схемам с результатами измерений (●), проведённых на TOR-станции ИОА СО РАН.

Результаты расчетов



Рассчитанные (●) и измеренные (X) значения концентрации аэрозоля для области, соответствующей расположению TOR-станции ИОА СО РАН.

Заключение

Выполнено усовершенствование негидростатической мезомасштабной метеорологической модели TSU-NM3 за счет включения схемы WSM6 параметризации образования осадков в виде снега и града для исследования погодных условий, характерных для Сибирского региона.

Показана результативность ее применения для различных сезонов Томского района.

Предложена новая модель суммарного механизма образования аэрозольных частиц и озона в атмосфере города.