

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС
Суперкомпьютерные дни
в России**

Москва, МГУ, 28 - 29 сентября 2026 г.

**Численное исследование турбулентного
атмосферного пограничного слоя с помощью
мезомасштабной модели TSUNM3 высокого
разрешения**

Старченко Александр Васильевич, Сваровский А.И.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

Организаторы Четвертой Сибирской конференции по параллельным вычислениям, Томск, ТГУ, 2007 г.



Слева направо: чл.-корр. РАН Вл.В. Воеводин (НИВЦ МГУ),
доцент В.Н. Берцун (ТГУ), профессор В.Э. Малышкин
(ИВМиМГ СО РАН), профессор А.В. Старченко (ТГУ)

Введение

- Численное моделирование турбулентной структуры в атмосферном пограничном слое с высоким разрешением является важной фундаментальной и прикладной задачей динамической метеорологии и численного прогнозирования погодных условий.



Введение

- Исторически при моделировании турбулентности в атмосферном пограничном слое (АПС) использовались два подхода в зависимости от соотношения размера горизонтальной сетки Δx и турбулентного масштаба энергосодержащих вихрей l .
- В моделях общей циркуляции и мезомасштабных моделях численного прогноза погоды, где размер сетки значительно превосходит масштаб турбулентности ($\Delta x \gg l$), применялись одномерные модели турбулентности АПС, базирующиеся на ансамблевом осреднении по Рейнольдсу RANS (Mellor, Yamada, Andre, Andren, Курбацкий А.Ф.,...).
- При проведении численного моделирования атмосферных процессов, в котором размер сетки был существенно меньше масштаба турбулентности ($\Delta x \ll l$), использовалось трехмерное нестационарное вихреразрешающее моделирование турбулентных течений LES (Deardorf, Лыкосов В.Н., Глазунов А.В.,...).

Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. 1982, Vol. 20. P. 851–875.

Deardorf J.W.. A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds number // J. Fluid Mech.. 1970. V. 41. P. 453–480.

Введение

- В ходе развития численного моделирования мезомасштабных атмосферных процессов появилась потребность проведения исследований в АПС в случае, когда размеры горизонтальной сетки используемой численной модели, сопоставимы с турбулентным масштабом энергосодержащих вихрей ($\Delta x \sim l$).
- В режиме «серой зоны» (Wyngaard, 2004) величина Δx сопоставима с глубиной АПС, и, таким образом, самые крупные турбулентные вихри не являются ни полностью параметризованными (мезомасштабный предел; $\Delta x \gg z_i$), ни полностью разрешенными численно [предел моделирования LES; $\Delta x \ll z_i$]. $l = z_i$ - высота слоя инверсии

Wyngaard, J.C. (2004) Towards Numerical Modelling in the “Terra Incognita”. Journal of Atmospheric Science, 61, 1816-1826.

Введение

- В статье Juliano et al разработали и внедрили в модель Weather Research & Forecasting (WRF) RANS 3D-параметризацию АПС для численного мезомасштабного моделирования с высоким разрешением.
- Эта RANS-параметризация основана на алгебраической модели, разработанной Меллором и Ямадой, дополнительно учитывает влияние трехмерных эффектов на турбулентную структуру, явно рассчитывая турбулентные потоки импульса, тепла и влаги в дополнение к кинетической энергии турбулентности.
- Эта 3D параметризация для моделирования АПС показала преимущества ее использования в конвективных условиях в «серой зоне» ($\Delta x \sim l$), поскольку она более точно воспроизводит эволюцию конвективных характеристик, чем традиционная 1D-схема АПС.
- Среди недостатков авторы указывают на необходимость улучшения представления в параметризации масштаба турбулентности.

Цель работы

- Целью данной работы является исследование поведения приземных характеристик температуры, скорости и направления ветра, турбулентных характеристик АПС в «серой зоне» моделирования турбулентности ($\Delta x \sim l$) на сетках с горизонтальным шагом $\Delta x \sim 1000$ и 333 м на основе мезомасштабной модели TSUNM3.
- Параллельные расчеты выполнены с применением оригинальной трехпараметрической модели турбулентности, включающей трехмерные нестационарные уравнения переноса для турбулентной кинетической энергии k , масштаба турбулентных пульсаций l и дисперсии турбулентных пульсаций потенциальной температуры.
- Для оценки достоверности полученных результатов численного моделирования привлекаются данные наблюдений метеостанций ИОА СО РАН, выполненные в 2022 году.

Основные уравнения модели TSUNM3

- В настоящей работе при проведении численного моделирования в течение суток использовалась негидростатическая мезомасштабная модель TSUNM3 (**Tomsk State University Nonhydrostatic Mesoscale Meteorological Model**), с уточненной информацией о рельефе и распределении категорий землепользования для города Томска.
- Основные уравнения мезомасштабной модели атмосферы TSUNM3 получаются для осредненных по Рейнольдсу дифференциальных уравнений гидротермодинамики в системе координат, связанной с поверхностью Земли.
- Вариации плотности квазистационарны.
- Пульсации плотности учитываются только при описании плавучести.
- Молекулярная диффузия полагается пренебрежимо малой по отношению к турбулентному обмену.

Основные уравнения модели TSUNM3

- Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W)}{\partial z} = 0$$

- Уравнения движения

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + fV - \frac{\partial \langle uu \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle uv \rangle}{\partial y} - \frac{\partial \langle uw \rangle}{\partial z}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - fU - \frac{\partial \langle vu \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle vv \rangle}{\partial y} - \frac{\partial \langle vw \rangle}{\partial z}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + g \frac{\Theta - \Theta_0}{\Theta_0} - \frac{\partial \langle wu \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle wv \rangle}{\partial y} - \frac{\partial \langle ww \rangle}{\partial z}$$

Основные уравнения модели TSUNM3

- Уравнение баланса энергии

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + U \frac{\partial \Theta}{\partial x} + V \frac{\partial \Theta}{\partial y} + W \frac{\partial \Theta}{\partial z} = -\frac{\partial \langle \theta u \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle \theta v \rangle}{\partial y} - \frac{\partial \langle \theta w \rangle}{\partial z} + \frac{\Theta}{\rho c_p T} (Q_{rad} - \rho L \Phi)$$

- Уравнение баланса водяного пара

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} + U \frac{\partial q_v}{\partial x} + V \frac{\partial q_v}{\partial y} + W \frac{\partial q_v}{\partial z} = -\frac{\partial \langle qu \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle qv \rangle}{\partial y} - \frac{\partial \langle qw \rangle}{\partial z} + L \Phi$$

- Уравнение состояния

$$P = \rho R T, \quad R = R_0 \left[\frac{1 - q_v}{M_{air}} + \frac{q_v}{M_{H_2O}} \right]$$

Уравнения модели турбулентности $k-l-\langle\theta^2\rangle$

- Уравнение для энергии турбулентности

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} + W \frac{\partial k}{\partial z} = P_s + P_b + \frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma_e \sqrt{k} l \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma_e \sqrt{k} l \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma_e \sqrt{k} l \frac{\partial k}{\partial z} \right) - \frac{C_D k^{\frac{3}{2}}}{l}$$

- Уравнение для масштаба турбулентности

$$\frac{\partial l}{\partial t} + U \frac{\partial l}{\partial x} + V \frac{\partial l}{\partial y} + W \frac{\partial l}{\partial z} = C_{l1} (P_s + P_b) \frac{l}{k} + C_{l2} \sqrt{k} \left[1 - \left(\frac{l}{\kappa z} \right)^2 \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma_e \sqrt{k} l \frac{\partial l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma_e \sqrt{k} l \frac{\partial l}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma_e \sqrt{k} l \frac{\partial l}{\partial z} \right)$$

- Уравнение для дисперсии температуры

$$\frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial t} + U \frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial x} + V \frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial y} + W \frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma_\theta \sqrt{k} l \frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma_\theta \sqrt{k} l \frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma_\theta \sqrt{k} l \frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial z} \right) - 2 \left(\langle u \theta \rangle \frac{\partial \Theta}{\partial x} + \langle v \theta \rangle \frac{\partial \Theta}{\partial y} + \langle w \theta \rangle \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right) - 2 \frac{\langle \theta^2 \rangle}{C_\theta \tau}$$

Старченко А.В., Дель И.В., Сваровский А.И. Моделирование турбулентности в атмосферном пограничном слое с использованием моментной алгебраической модели // Оптика атмосферы и океана. - 2025. - № 3 (434) 38. - С. 222-231

Уравнения для напряжений Рейнольдса и тепловых потоков в равновесном приближении для условий квазиоднородного АПС

$$\begin{aligned}\langle u^2 \rangle &= \frac{2k}{3} - \frac{2\tau}{3C_1} \left[E_1 \langle uw \rangle \frac{\partial U}{\partial z} - E_2 \langle vw \rangle \frac{\partial V}{\partial z} + E_3 \frac{g}{\Theta} \langle \theta w \rangle \right]; & \langle uw \rangle &= -E_5 \tau \langle w^2 \rangle \frac{\partial U}{\partial z} + E_6 \tau \frac{g}{\Theta} \langle \theta u \rangle; \\ \langle v^2 \rangle &= \frac{2k}{3} - \frac{2\tau}{3C_1} \left[-E_2 \langle uw \rangle \frac{\partial U}{\partial z} + E_1 \langle vw \rangle \frac{\partial V}{\partial x_3} + E_3 \frac{g}{\Theta} \langle \theta w \rangle \right]; & \langle vw \rangle &= -E_5 \tau \langle w^2 \rangle \frac{\partial V}{\partial z} + E_6 \tau \frac{g}{\Theta} \langle \theta v \rangle; \\ \langle w^2 \rangle &= \frac{2}{3C_1} \left[C_1 k + \tau \left(E_4 \langle uw \rangle \frac{\partial U}{\partial z} + E_4 \langle vw \rangle \frac{\partial V}{\partial z} + 2E_3 \frac{g}{\Theta} \langle \theta w \rangle \right) \right]; & \langle uv \rangle &= -\frac{(1-C_2)}{C_1} \tau \left[\langle vw \rangle \frac{\partial U}{\partial z} + \langle uw \rangle \frac{\partial V}{\partial z} \right]; \\ \langle \theta u \rangle &= -\frac{\tau}{C_{1\theta}} \left[\langle uw \rangle \frac{\partial \Theta}{\partial z} + (1-C_{2\theta}) \langle \theta w \rangle \frac{\partial U}{\partial z} \right]; & & \\ \langle \theta v \rangle &= -\frac{\tau}{C_{1\theta}} \left[\langle vw \rangle \frac{\partial \Theta}{\partial z} + (1-C_{2\theta}) \langle \theta w \rangle \frac{\partial V}{\partial z} \right]; & & \\ \langle \theta w \rangle &= -\frac{\tau}{C_{1\theta}} \left[\langle w^2 \rangle \frac{\partial \Theta}{\partial z} - (1-C_{3\theta}) \frac{g}{\Theta} \langle \theta^2 \rangle \right] & & \end{aligned}$$

$$C_1 = 1,8; \quad C_2 = 0,6; \quad C_3 = 0,5; \quad C_{1\theta} = 3,0; \quad C_{2\theta} = 0,346; \quad C_{3\theta} = 1/3;$$

$$E_1 = 2 - 2C_2; \quad E_2 = 1 - C_2; \quad E_3 = 1 - C_3; \quad E_4 = E_1 - E_2;$$

$$E_5 = \frac{1-C_2}{C_1}; \quad E_6 = \frac{1-C_3}{C_1}$$

Andren A. Evolution of a Turbulence Closure Scheme Suitable for Air-Pollution Application // Journal of Applied Meteorology, 1990, vol.29, pp. 224–239.

Juliano T.W., Kosović B., Jiménez P.A., Eghdami M., Haupt S.E., Martilli A. “Gray Zone” Simulations Using a Three-Dimensional Planetary Boundary Layer Parameterization in the Weather Research and Forecasting Model // Monthly Weather Review. 2022. Vol. 150. P.1585–1619.

Численный метод

- Преобразование координат
- Метод конечного объема
- Явно-неявные разностные схемы и монотонная аппроксимация конвективных и диффузионных потоков L_h второго порядка

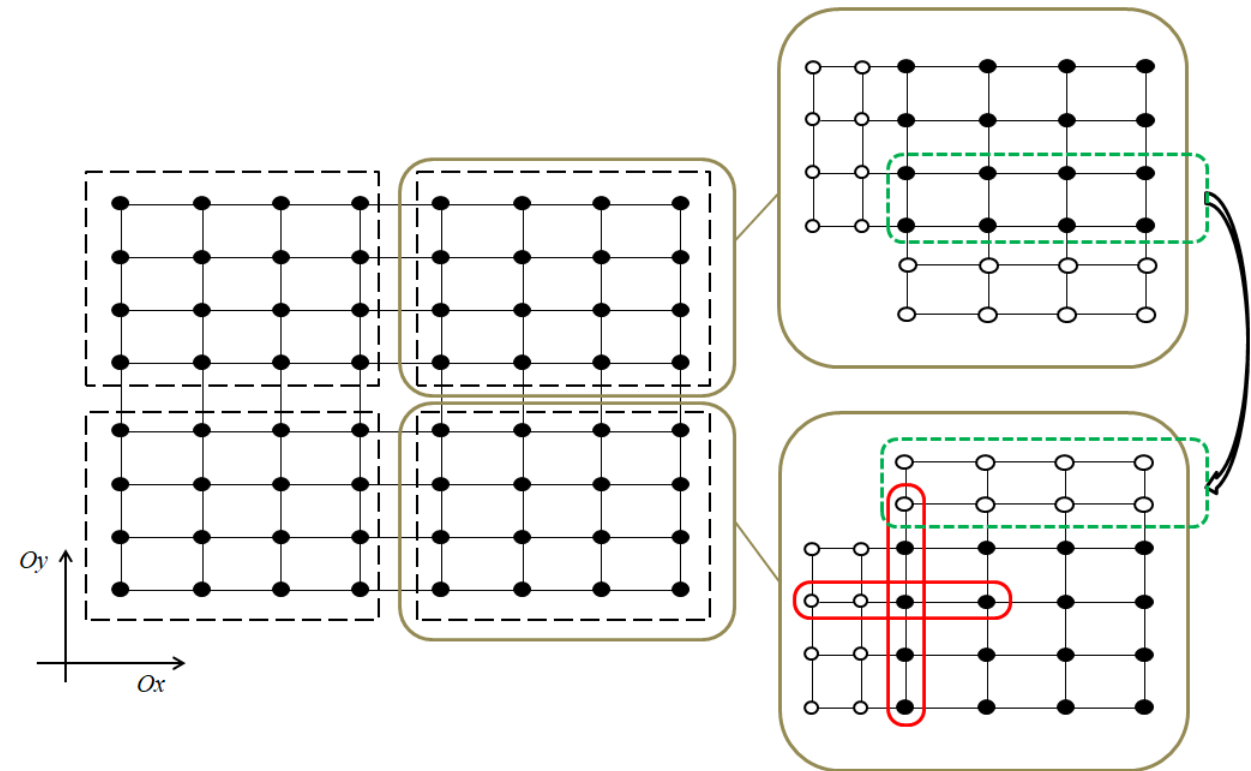
$$\sigma = H \frac{z - h(x, y)}{H - h(x, y)}$$

$$\frac{\Phi_h^{t+\tau} - \Phi_h^t}{\tau} = - \left(\frac{3}{2} L_h^{xy} \Phi_h^t - \frac{1}{2} L_h^{xy} \Phi_h^{t-\tau} \right) - \left(\frac{1}{2} L_h^z \Phi_h^{t+\tau} + \frac{1}{2} L_h^z \Phi_h^t \right) + \left(\frac{3}{2} S_h^t - \frac{1}{2} S_h^{t-\tau} \right)$$

- Схема предиктор-корректор для расчета согласованных по уравнению неразрывности полей скорости и давления:
- на шаге предиктор – расчет полей скорости на основе поля давления p_h^t ,
- на шаге корректор – решение разностного уравнения Пуассона $\Delta_h p'_h = f_h$ методом Гаусса-Зейделя с последующей коррекцией давления $p_h^{t+\tau} = p_h^t + p'_h$
- и коррекцией компонент скорости через p'_h
- Метод условно устойчивый: $\tau < 3\Delta x$, Δx – шаг горизонтальной сетки в км

Параллельная реализация

- Двумерная декомпозиция сеточной области с перекрывающимися областями
- Технология Message Passing Interface для многопроцессорной вычислительной системы с распределенной памятью
- Неблокирующие функции MPI для передачи сообщений



Параллельная реализация

- Расчеты по мезомасштабной модели проводились на сетке 100x100x41 на двое суток = 172 800 секунд на вычислительном кластере ТГУ Cyberia
<https://cyberia.scc.tsu.ru/>,
- один вычислительный узел которого имеет следующие характеристики:
- 48Gb RAM, 2xIntel® Xeon® CPU 5670 InfiniBand QDR 40 Гбит/с.

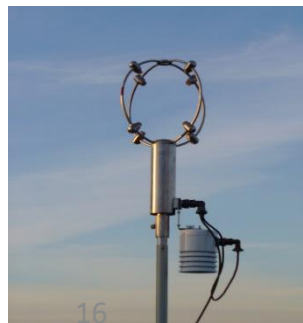


Кол-во ПЭ р	4	16	36	64	144	256
Ускорение Sp	4	15,2	35,6	64	106,7	160
Эфф-ть Ep	1	0,95	0,99	1	0,74	0,625

Сравнение с натурными наблюдениями

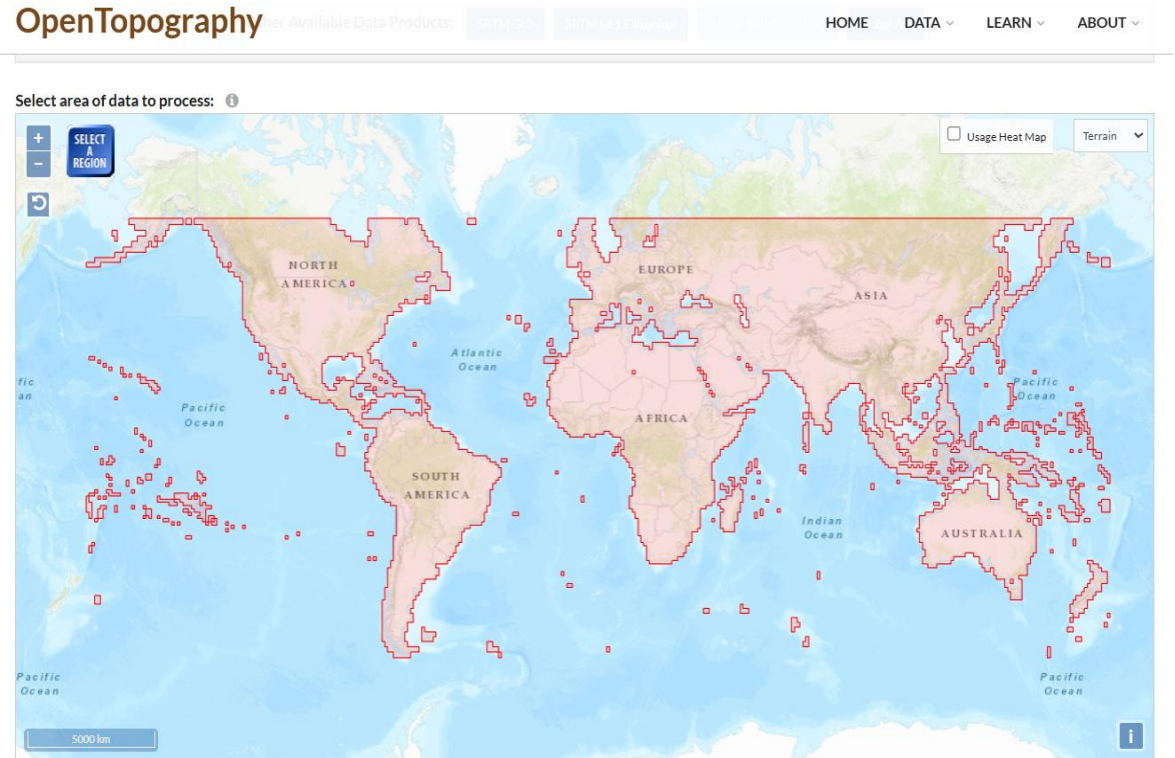


- В данной работе модель TSUNM3 (вместе с 10-30м данными о рельефе и категориях землепользования для условий г. Томск) была использована для численного исследования поведения приземных характеристик температуры, скорости и направления ветра, турбулентных характеристик АПС в «серой зоне» моделирования турбулентности ($\Delta x < l$, $\Delta x = 333\text{м}$) над Базовым экспериментальным комплексом (БЭК) ИОА СО РАН (85,10° в.д. и 56,482° с.ш.) для четырех дат: **6 июня, 5 и 14 июля, 9 августа 2022 года.**
- Расчетные значения метеорологических параметров сравнивались с приземными значениями температуры и скорости, измеряемыми с помощью ультразвуковых метеостанций «Метео-2», расположенных над поверхностью на высоте 10 м, а также вертикальными профилями абсолютной температуры в АПС, восстанавливаемых с помощью температурного профилемера МТР-5.



Обработка данных рельефа и категорий землепользования

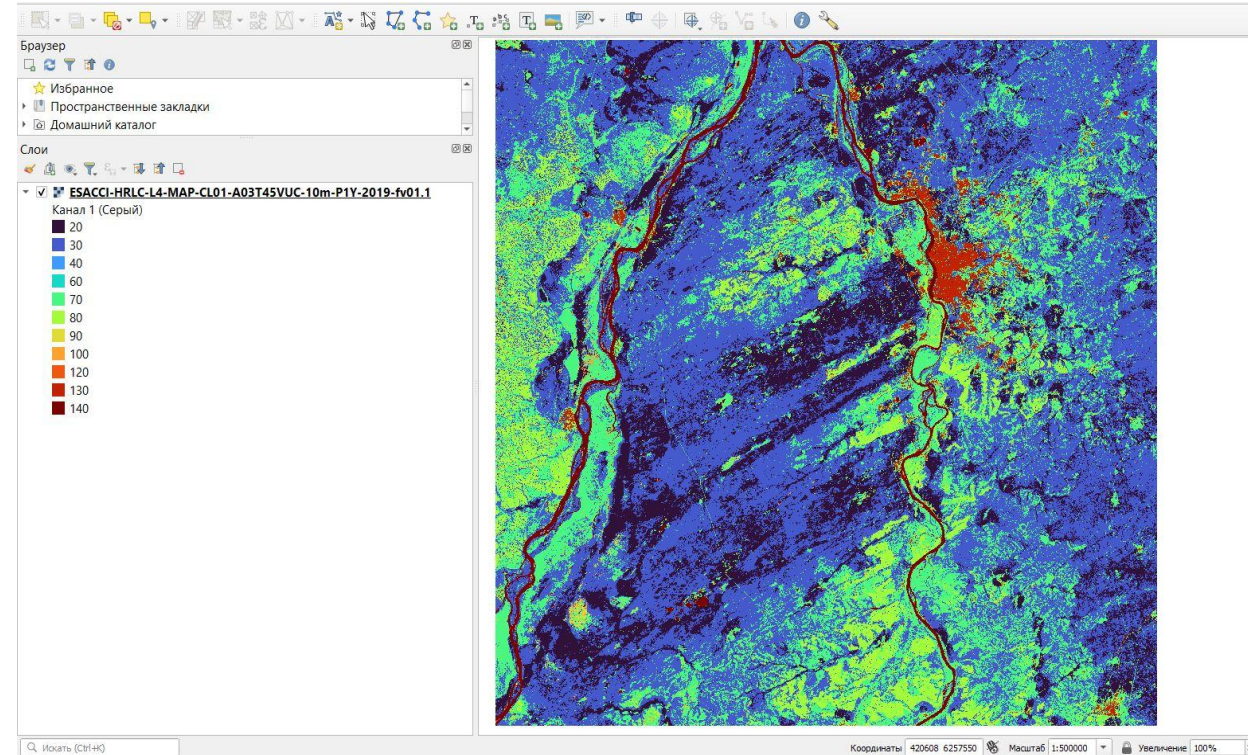
- Для получения необходимых для проведения расчетов в «серой зоне» моделирования турбулентности данных о рельефе и распределении категорий землепользования для рассматриваемой области были использованы результаты SRTM с разрешением 30м.
- SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) представляла собой специально модифицированную радиолокационную систему, которая была установлена на борту космического шаттла Endeavour во время 11-дневной миссии в феврале 2000 года.



Mapscaping. Global Elevation Data Download Tool [Электронный ресурс]. URL: <https://mapscaping.com/global-elevation-data-download-tool/> (дата обращения 28.02.2025)

Обработка данных рельефа и категорий землепользования

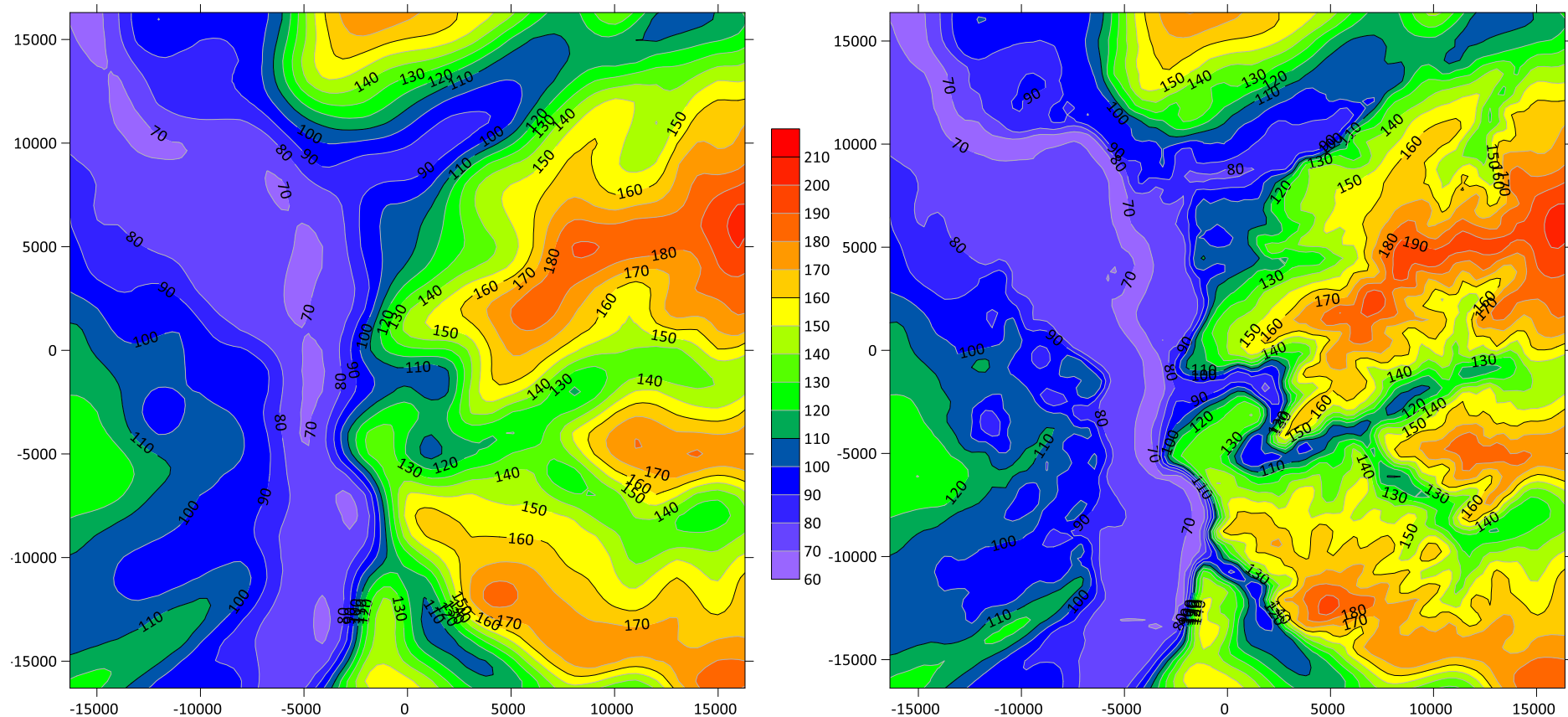
- Данные категорий землепользования для города Томска с разрешением 10м были получены из базы данных The Centre for Environmental Data Analysis Archive.
- Основными источниками информации, на основании которой определяется класс растительного покрова, являются оптические снимки Sentinel-2 и радиолокационные данные Sentinel-1.
- Такой подход объясняется требуемым пространственным разрешением продукта, равным 10 м. Данные проекта Climate Change Initiative High Resolution Land Cover содержат информацию о растительном покрове за 2019 год.



The Centre for Environmental Data Analysis Archive. Earth Observation Data [Электронный ресурс]. URL:

https://data.ceda.ac.uk/neodc/esacci/high_resolution_land_cover/data/land_cover_maps/A03_Siberia/static/v1.2/geotiff/HRLC10/tiles/2019 (дата обращения 10.03.2025)
27.09.2026

Представление рельефа поверхности с разрешением $\Delta x=1\text{ км}$ и $\Delta x=333\text{ м}$

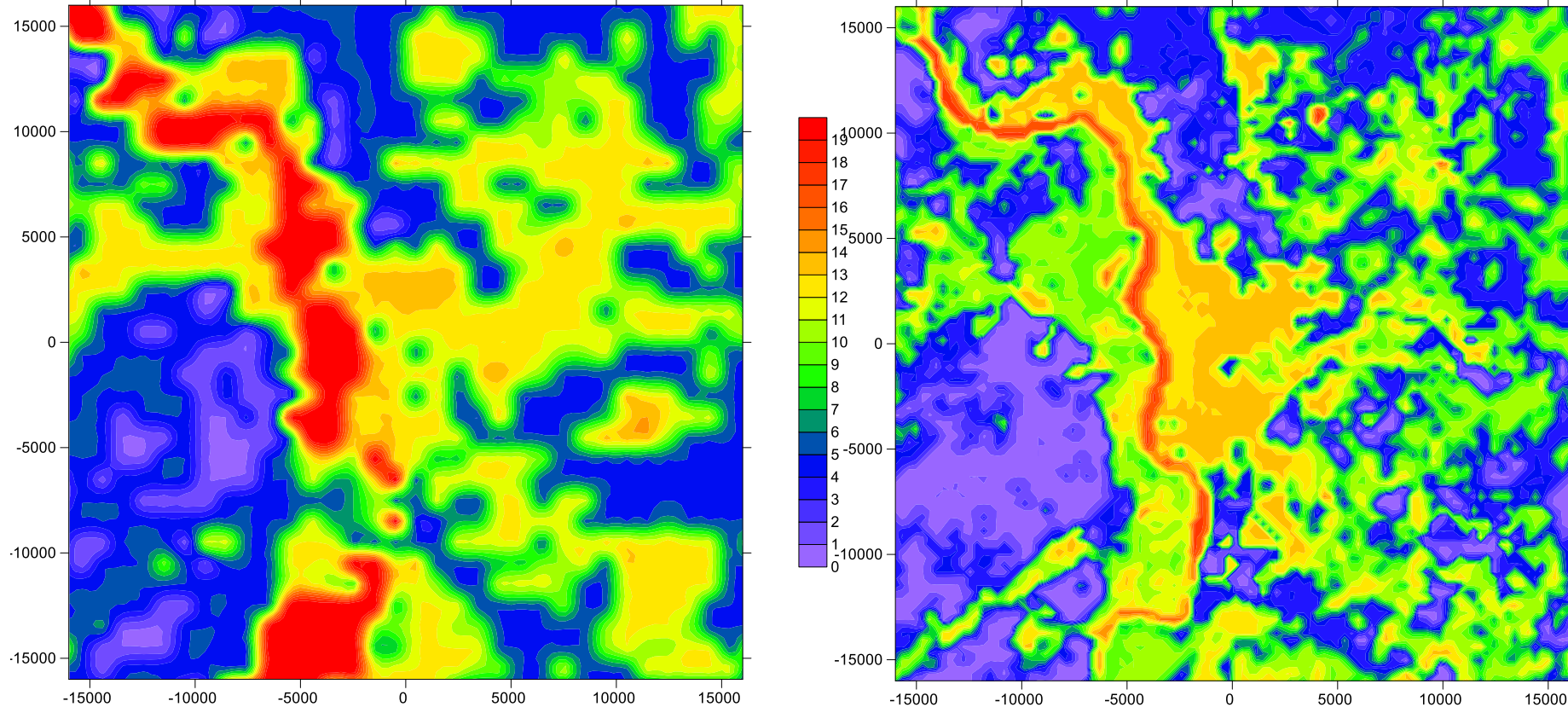


Рельеф земной поверхности из различных источников с различным горизонтальным разрешением. Слева – WPS_GEOG ($\Delta x=1\text{ км}$), справа – SRTM ($\Delta x=333\text{ м}$). Фиолетовым цветом указано русло реки Томь.

Размер области 32х32км. В центре г. Томск

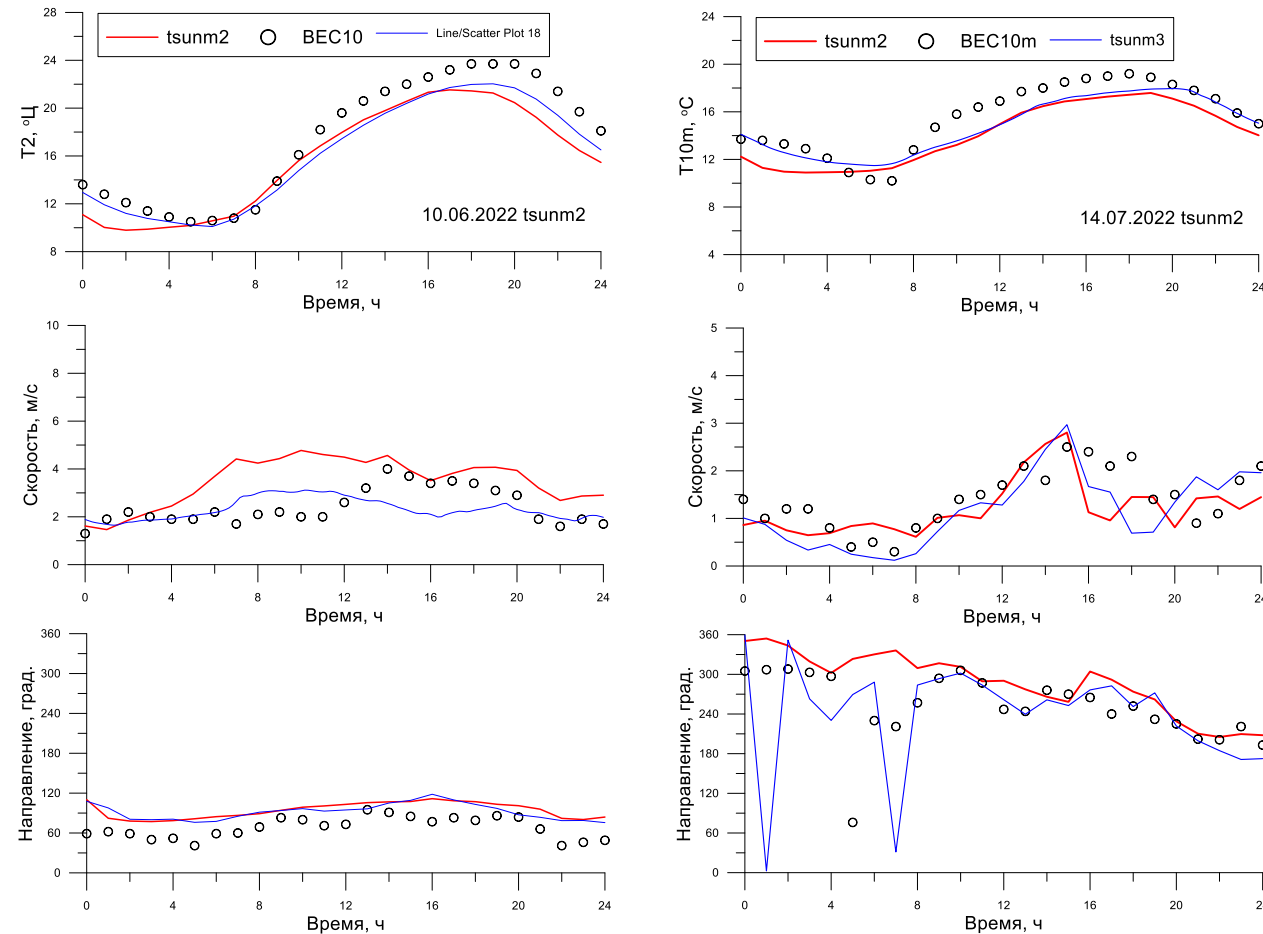
Представление категорий землепользования с разрешением $\Delta x=1\text{ км}$ и $\Delta x=333\text{ м}$

Номер IGBP MODIS класса	Описание IGBP MODIS класса
1	Evergreen Needleleaf Forests
4	Deciduous Broadleaf Forests
3	Deciduous Needleleaf Forests
7	Shrubland
7	Shrubland
10	Grasslands
12	Croplands
7	Shrubland
10	Grasslands
10	Grasslands
16	Barren
13	Urban and Built-up Lands
17	Water



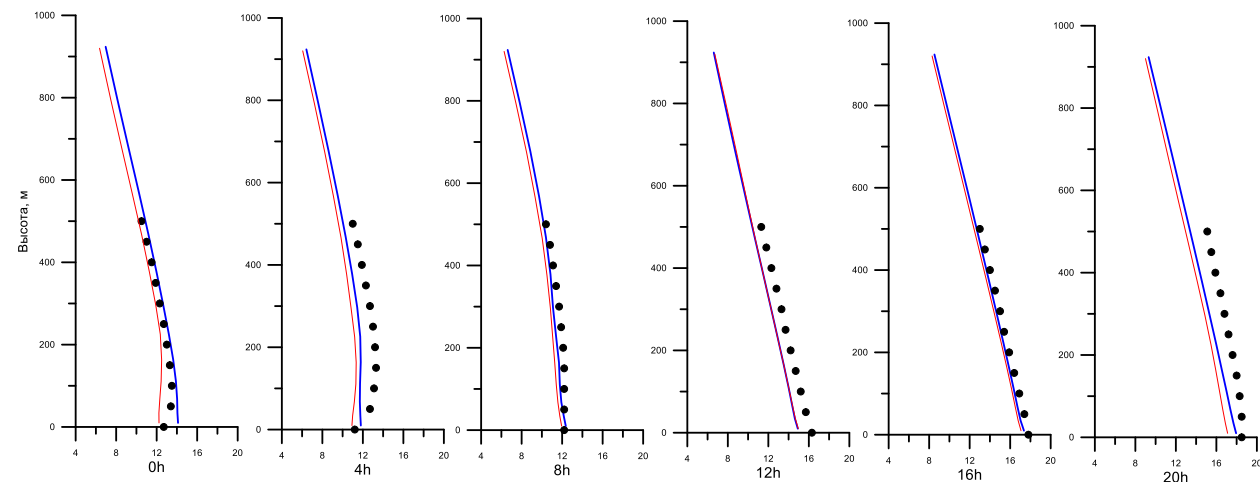
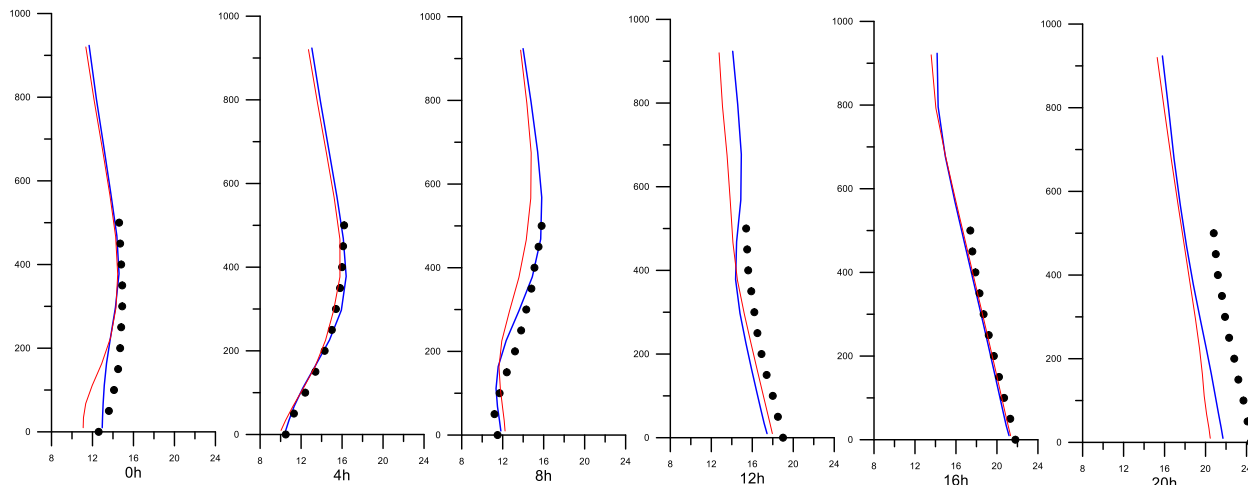
Распределение категорий землепользования земной поверхности для города Томск с горизонтальным разрешением 1000 м (слева) и 333 м (справа).

Сравнение с натурными наблюдениями



Рассчитанные и измеренные значения приземной температуры, скорости и направления ветра с горизонтальным разрешением 1000 (синяя) и 333 (красная) м в пункте наблюдения БЭК для 10 июня и 14 июля 2022 года. Время местное.

Сравнение с натурными наблюдениями



Рассчитанные (линии) и измеренные МТР-5 (значки) вертикальные профили приземной температуры с горизонтальным разрешением 1000 и 333 м над пунктом БЭК через 4 часа для 10 июня и 14 июля 2022 года

27.09.2026

22

Сравнение с натурными наблюдениями

Метеопараметр	Метрика	TSUNM3 1000m	TSUNM3 333m
Температура, °C	MAE	0.858	1.002
	RMSE	1.055	1.216
	CRMSE	1.050	1.120
	R	0.988	0.984
	IOA	0.991	0.988
Скорость ветра, м/с	MAE	1.320	1.181
	RMSE	1.594	1.412
	CRMSE	1.308	0.855
	R	0.475	0.774
	IOA	0.641	0.719
Направление ветра, град	MAE	36.973	23.868
	RMSE	60.425	37.176
	CRMSE	60.422	30.967
	R	0.838	0.960
	IOA	0.912	0.971

Таблица. Метрики MAE, RMSE, CRMSE, R, IOA для временных рядов 6.06, 5.07, 14.07, 9.08. 2022

Заключение

- Для исследования поведения приземных характеристик температуры, скорости и направления ветра, турбулентных характеристик АПС в «серой зоне» моделирования турбулентности ($\Delta x \sim l$) на сетках с горизонтальным шагом $\Delta x = 1000$ и 333 м применена нестационарная трехмерная модель турбулентности $k-l-\langle \theta^2 \rangle$.
- Рассматриваемая дифференциальная задача решается численно с помощью метода конечного объема, структурированных сеток, аппроксимаций второго порядка по времени и координатам. Для ускорения вычислений применяется двумерная декомпозиция сеточной области и технология интерфейса передачи сообщений. Такой подход обеспечил не менее 75% эффективность параллельной программы вплоть до использования 144 параллельных процессов на сетке $100 \times 100 \times 41$ в течение двух суток моделирования.
- Расчеты проведены с использованием мезомасштабной модели TSUNM3 с уточненными 10-30м данными о рельефе и категориях землепользования для условий г. Томск для дат 6.06.2022, 10.06.2022, 5.07.2022, 14.07.2022, 9.08.2022 с развитием конвективного пограничного слоя.
- Результаты расчетов сравнивались с измерениями метеостанций «Метео-2», температурного профилемера МТР-5 БЭК ИОА СО РАН.
- Применение в расчетах более подробной сетки обеспечивает уменьшение расхождения расчетов с данными наблюдений.