

V Всероссийская конференция с международным участием
Турбулентность, динамика атмосферы и климата
посвященная памяти академика Александра Михайловича Обухова
19–21 ноября 2024 г. Москва

Численное моделирование турбулентности в атмосферном пограничном слое с использованием моментной алгебраической модели

Старченко Александр Васильевич, Дель И.В., Сваровский А.И.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

Введение

- Численное моделирование турбулентной структуры в атмосферном пограничном слое (АПС) является важной фундаментальной и прикладной задачей динамической метеорологии и численного прогнозирования погодных условий.

Введение

- Исторически при моделировании турбулентности в атмосферном пограничном слое 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,...).
- 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, ...).

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 (*) разработали и внедрили в модель Weather Research & Forecasting (WRF) 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 разработка и применение оригинального метода расчета турбулентных параметров АПС в мезомасштабных моделях численного прогноза погоды с высоким разрешением ($\Delta x \sim 1\text{ км}$), который опирается на ансамблевое осреднение по Рейнольдсу (RANS) и трехпараметрическую модель турбулентности, включающую 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 динамики турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя в течение суток использовалась негидростатическая мезомасштабная модель TSUNM3 (Tomsk State University Nonhydrostatic Mesoscale Meteorological Model).
- 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 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

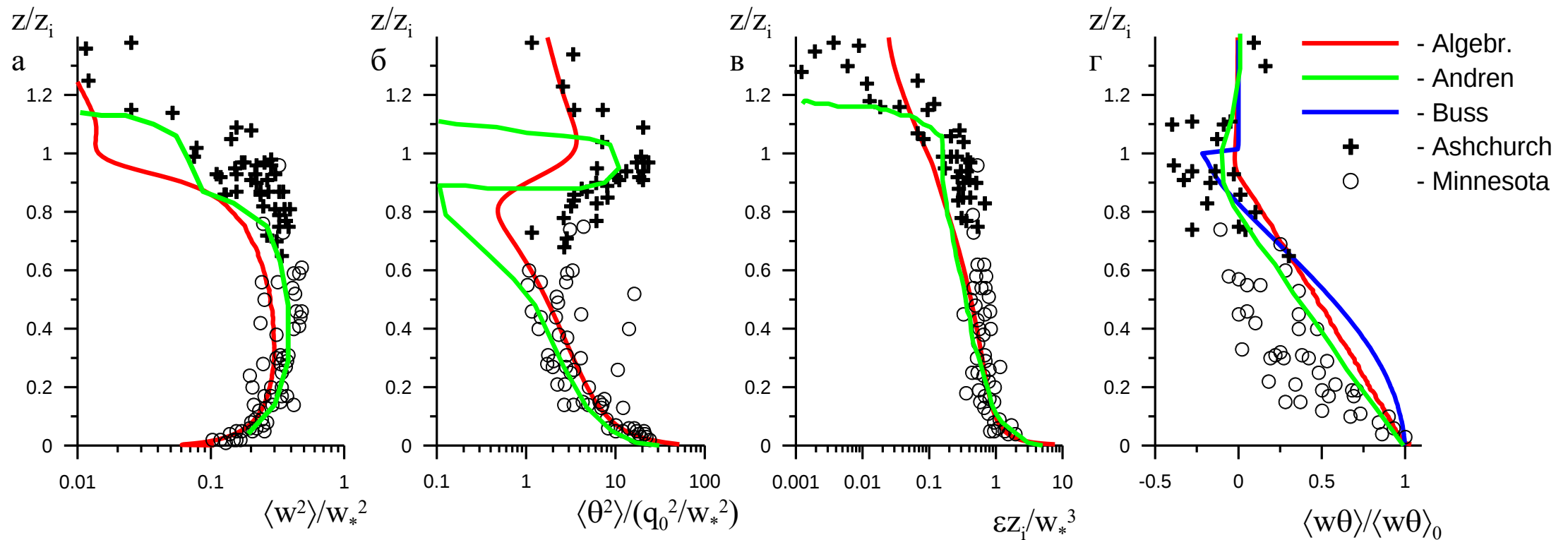
$$\frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial t} + U \frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial x} + V \frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial y} + W \frac{\partial \langle \theta^2 \rangle}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(C_\theta \sqrt{k} l \frac{\partial \langle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

Уравнения для напряжений Рейнольдса и тепловых потоков

$$\begin{aligned}
 \langle u^2 \rangle &= \frac{2k}{3} + \frac{FD_1 \langle w^2 \rangle}{C_1} - \frac{2\tau}{3C_1} \left[E_1 \langle uw \rangle \frac{\partial U}{\partial z} - E_2 \langle vw \rangle \frac{\partial V}{\partial z} + E_3 \frac{g}{\theta} \langle \theta w \rangle \right]; & \langle uw \rangle &= -E_5 \tau \langle w^2 \rangle \frac{\partial U}{\partial z} + E_6 \tau \frac{g}{\theta} \langle \theta u \rangle; \\
 \langle v^2 \rangle &= \frac{2k}{3} + \frac{FD_1 \langle w^2 \rangle}{C_1} - \frac{2\tau}{3C_1} \left[-E_2 \langle uw \rangle \frac{\partial U}{\partial z} + E_1 \langle vw \rangle \frac{\partial V}{\partial z} + E_3 \frac{g}{\theta} \langle \theta w \rangle \right]; & \langle vw \rangle &= -E_5 \tau \langle w^2 \rangle \frac{\partial V}{\partial z} + E_6 \tau \frac{g}{\theta} \langle \theta v \rangle; \\
 \langle w^2 \rangle &= \frac{2}{3(C_1 + 2D_1F)} \left[C_1 k + \tau \left(E_4 \langle uw \rangle \frac{\partial U}{\partial z} + E_4 \langle vw \rangle \frac{\partial V}{\partial z} + 2E_3 \frac{g}{\theta} \langle \theta w \rangle \right) \right]; & \langle uv \rangle &= -\frac{(1-C_2)}{C_1} \tau \left[\langle vw \rangle \frac{\partial U}{\partial z} + \langle uw \rangle \frac{\partial V}{\partial z} \right]; \\
 \langle \theta u \rangle &= -\frac{\tau}{C_{1\theta}} \left[\langle uw \rangle \frac{\partial \Theta}{\partial z} + (1-C_{2\theta}) \langle \theta w \rangle \frac{\partial U}{\partial z} \right]; & & \\
 \langle \theta v \rangle &= -\frac{\tau}{C_{1\theta}} \left[\langle vw \rangle \frac{\partial \Theta}{\partial z} + (1-C_{2\theta}) \langle \theta w \rangle \frac{\partial V}{\partial z} \right]; & & \\
 \langle \theta w \rangle &= -\frac{\tau}{(C_{1\theta} + FD_{1\theta})} \left[\langle w^2 \rangle \frac{\partial \Theta}{\partial z} - (1-C_{3\theta}) \frac{g}{\theta} \langle \theta^2 \rangle \right] & &
 \end{aligned}$$

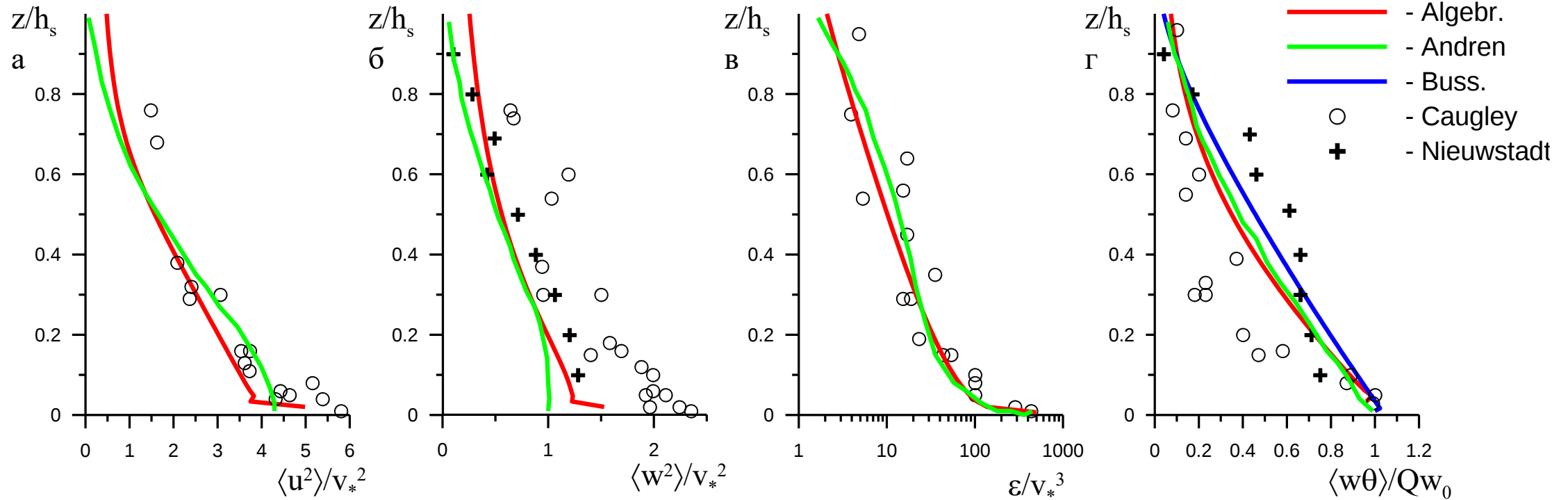
$$\begin{aligned}
 C_1 &= 1,8; \quad C_2 = 0,6; \quad C_3 = 0,5; \quad C_{1\theta} = 3,0; \quad C_{2\theta} = 0,346; \quad C_{3\theta} = 1/3; \\
 D_1 &= 0,5; \quad D_2 = 0,3; \quad D_{1\theta} = 0,806; \quad F = \frac{l}{kz}; \quad E_1 = 2 - 2C_2 + C_2 D_2 F; \\
 E_2 &= 1 - C_2 - C_2 D_2 F; \quad E_3 = 1 - C_3; \quad E_4 = E_1 - E_2; \\
 E_5 &= \frac{1 - C_2 + 1,5 D_2 C_2 F}{C_1 + 1,5 D_1 F}; \quad E_6 = \frac{1 - C_3}{C_1 + 1,5 D_1 F}
 \end{aligned}$$

Однородный конвективный АПС



Безразмерные профили а) $\langle w^2 \rangle$, б) дисперсии потенциальной температуры $\langle \theta^2 \rangle$, в) диссипации ТКЕ, г) вертикального теплового потока $\langle w\theta \rangle$. Эксперименты и расчеты.

Однородный устойчивый АПС

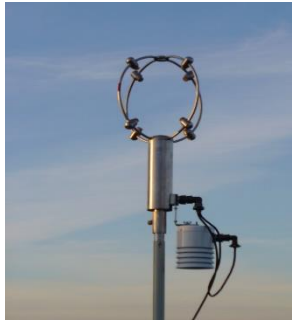


Безразмерные профили а) $\langle u^2 \rangle$, б) $\langle w^2 \rangle$, в) диссипации ТКЕ, г) вертикального теплового потока $\langle w\theta \rangle$. Эксперименты и расчеты.

Сравнение с натурными наблюдениями

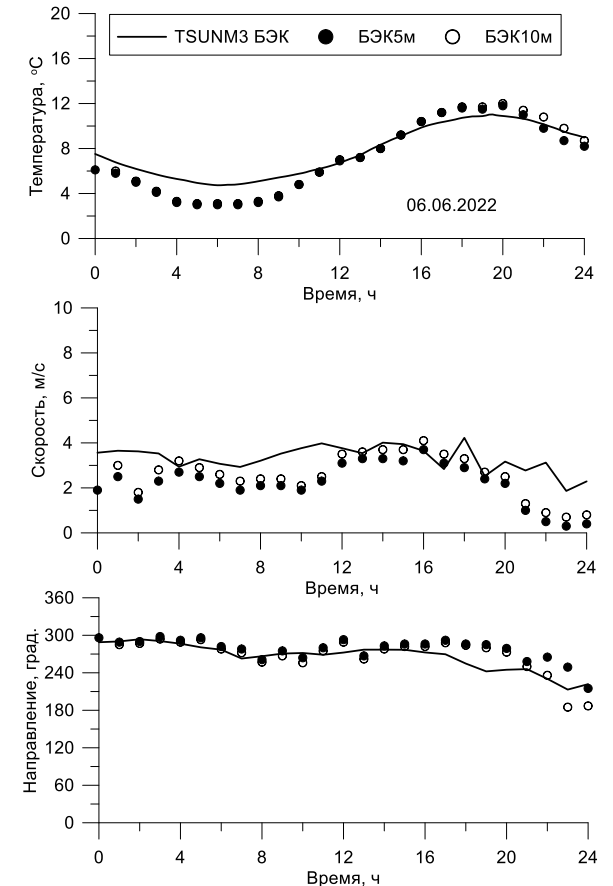
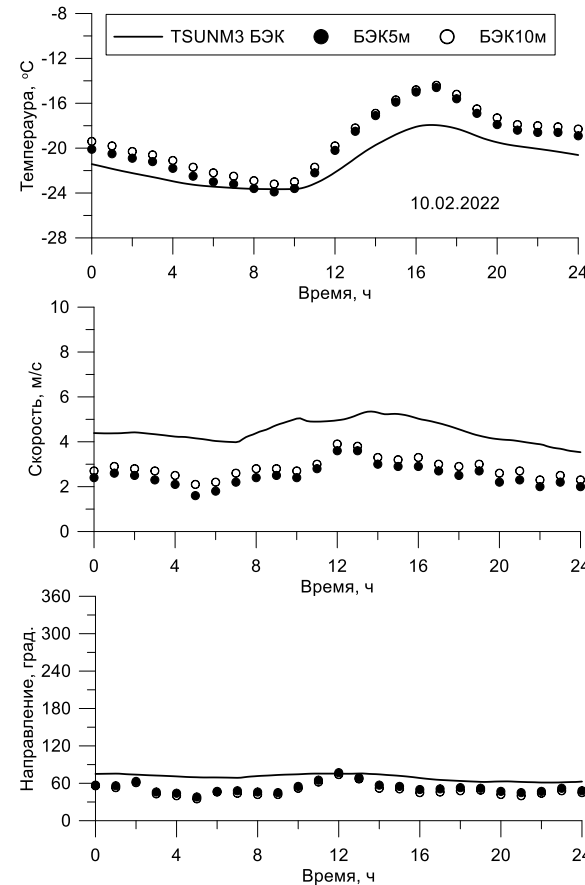


- В данной работе модель была использована для численного исследования турбулентной структуры над Базовым экспериментальным комплексом (БЭК) ИОА СО РАН (85,10° в.д. и 56,42° с.ш.) для двух дат: 10 февраля и 6 июня 2022 года.
- Расчетные значения метеорологических параметров сравнивались с приземными значениями температуры и скорости, измеряемыми с помощью ультразвуковых метеостанций «Метео-2», расположенных над поверхностью на высоте 5 и 10 м, а также вертикальными профилями абсолютной температуры, скорости и направления ветра в АПС, восстанавливаемых с помощью температурного профилемера МТР-5 и содара «Волна»

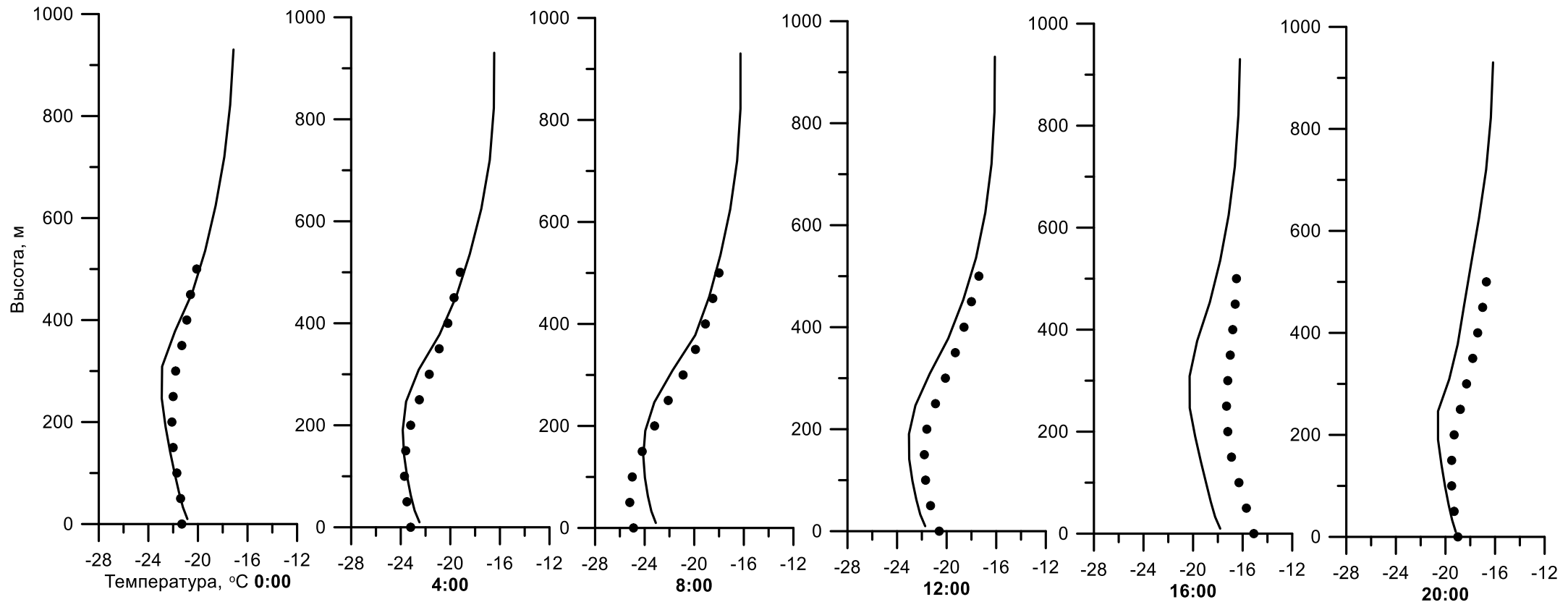


Сравнение с натурными наблюдениями

- Рассчитанные и измеренные значения приземной температуры, скорости и направления ветра в пункте наблюдения БЭК. Время местное.
- 10 февраля 2022 года в Томске отмечалась ясная погода с преобладанием северо-восточного ветра 2 м/с. Минимальная температура $-24,2^{\circ}$ (около 10 ч), максимальная $-14,1^{\circ}$ (в 16 ч), относительная влажность составила 43-69%. Территория покрыта снегом, высота снежного покрова 55 см.
- 6 июня 2022 года в Томске отмечалась облачная погода с прояснением к концу суток. Нижняя граница облачности составляла 300-600м. С 1 до 7 часов местного времени выпало 0,9 мм осадков, и в 13 часов – 0,5 мм. Температура воздуха изменялась от $3,6$ до $13,2^{\circ}\text{C}$. В течение суток наблюдался западный – северо-западный ветер, скорость 2 м/с, днем отмечалось незначительное увеличение скорости до 3 м/с



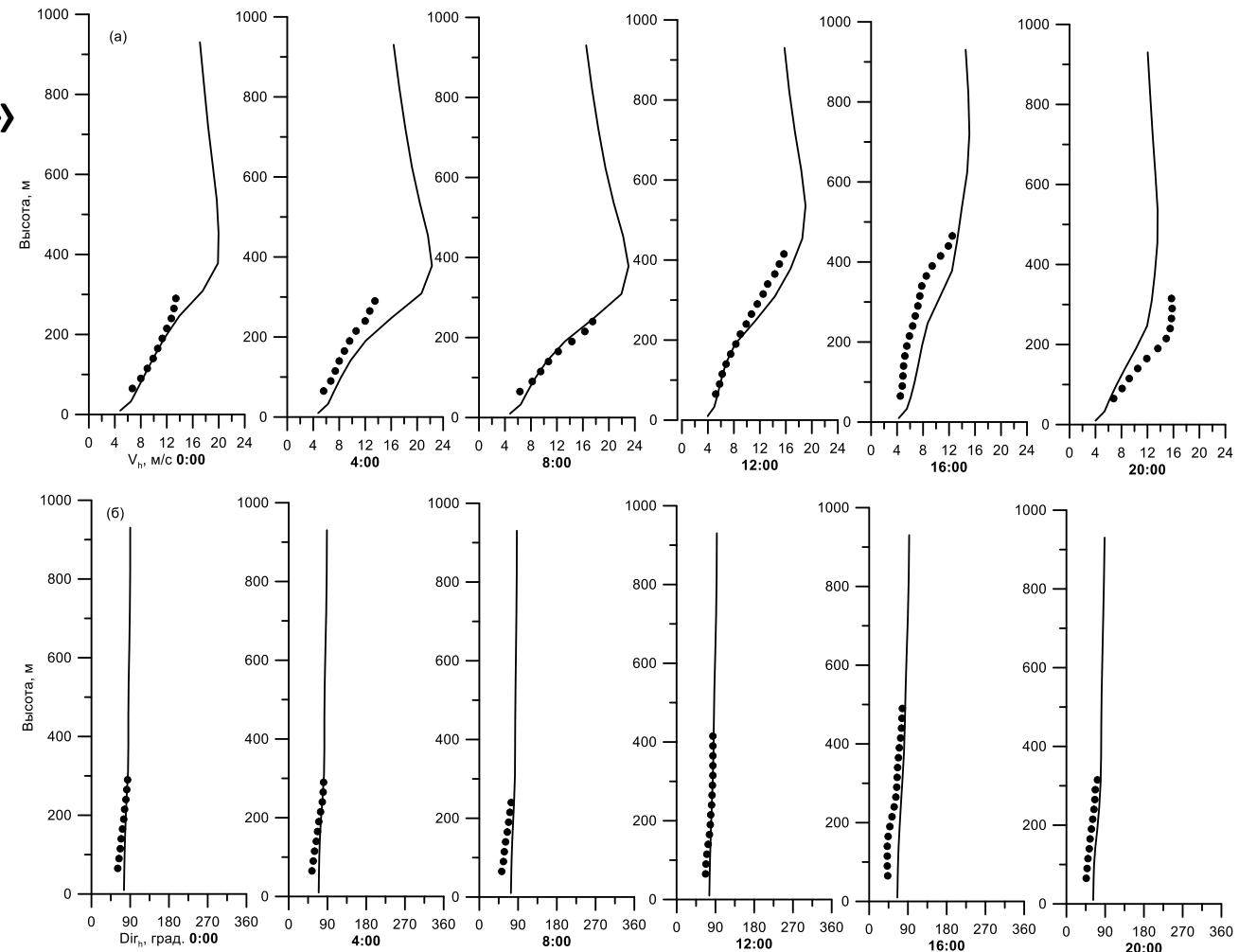
Сравнение с натурными наблюдениями



Рассчитанные (линии) и измеренные МТР-5 (значки) вертикальные профили приземной температуры над пунктом БЭК через 4 часа для 10 февраля 2022 года

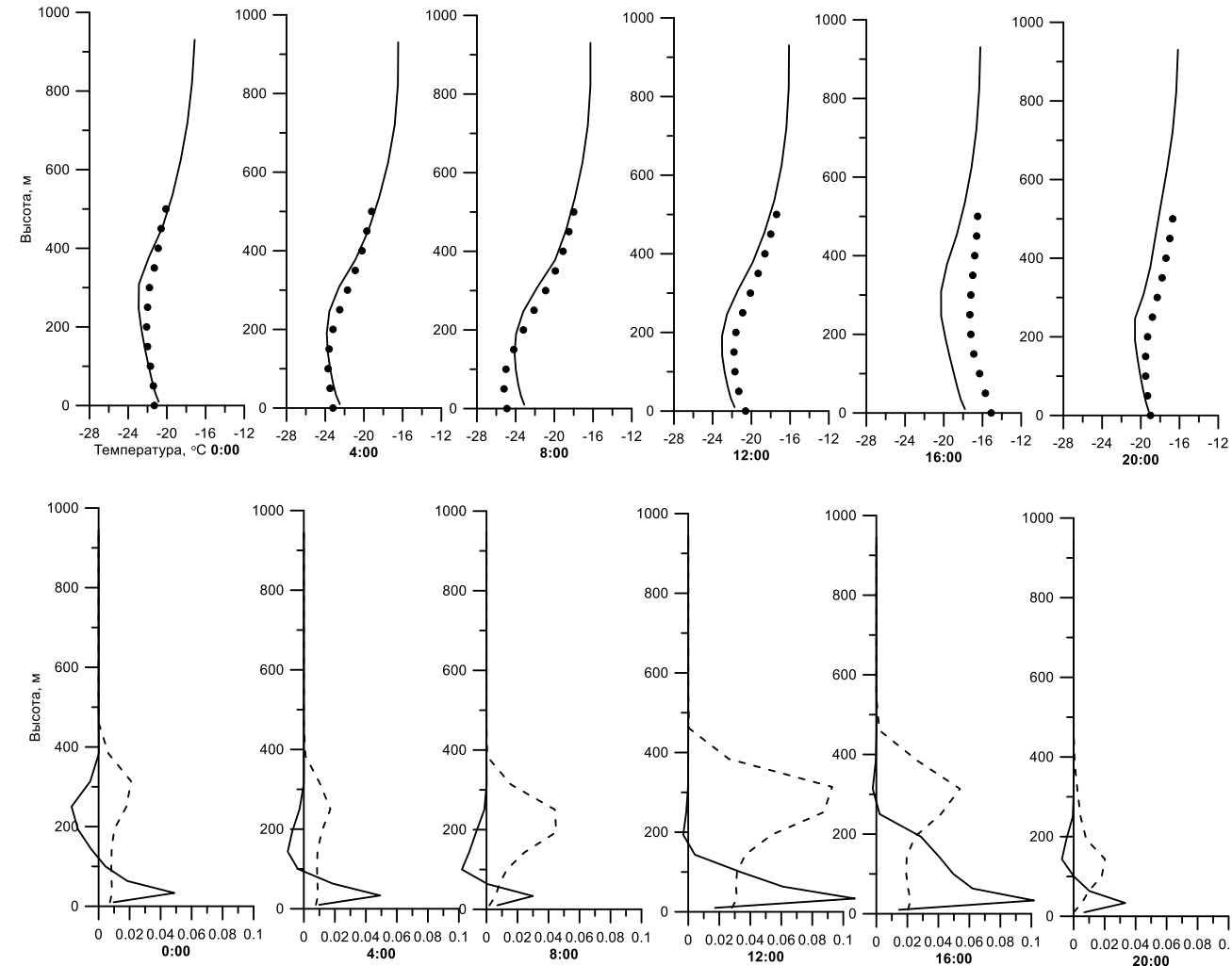
Сравнение с натурными наблюдениями

- Рассчитанные (линии) и измеренные содаром «Волна» (значки) вертикальные профили скорости (а) и направления (б) горизонтального ветра над пунктом БЭК через 4 часа для 10 февраля 2022 года

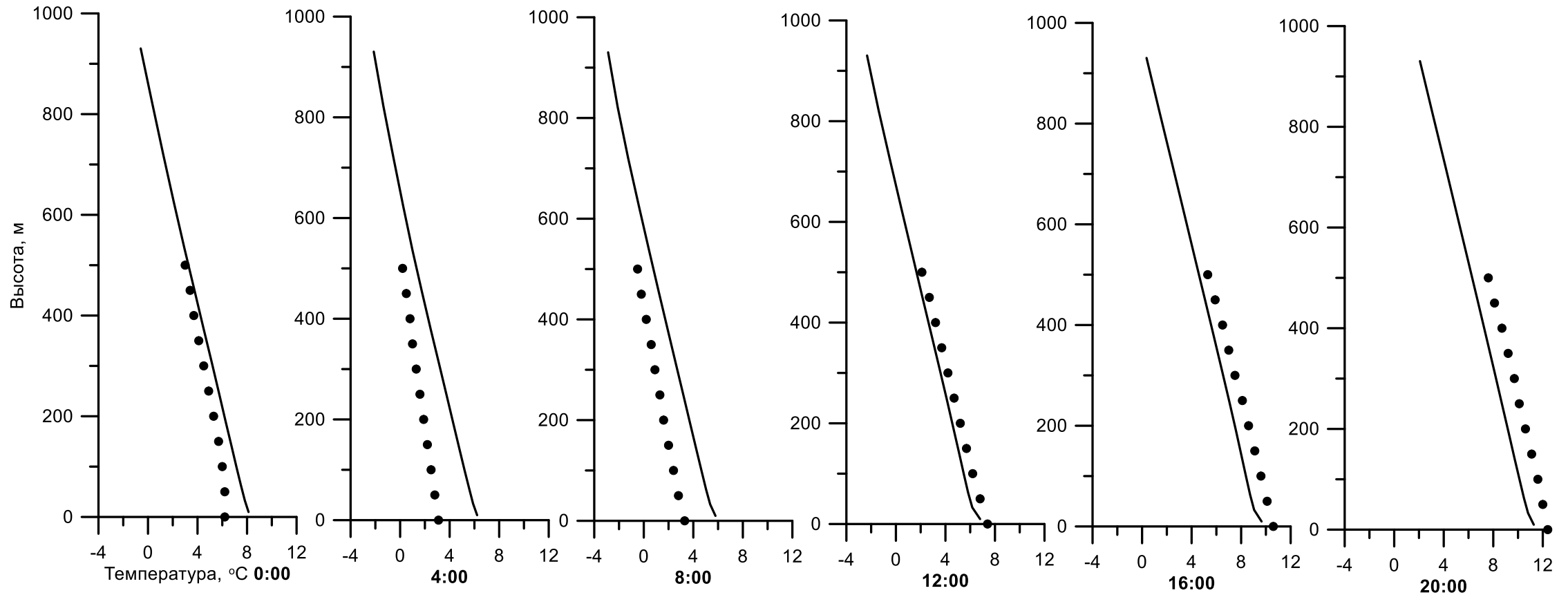


Сравнение с натурными наблюдениями

- Рассчитанные вертикальные профили температуры, турбулентного теплового потока (сплошная линия) и квадрата пульсаций температуры (штриховая) над пунктом БЭК через 4 часа для 10 февраля 2022 года



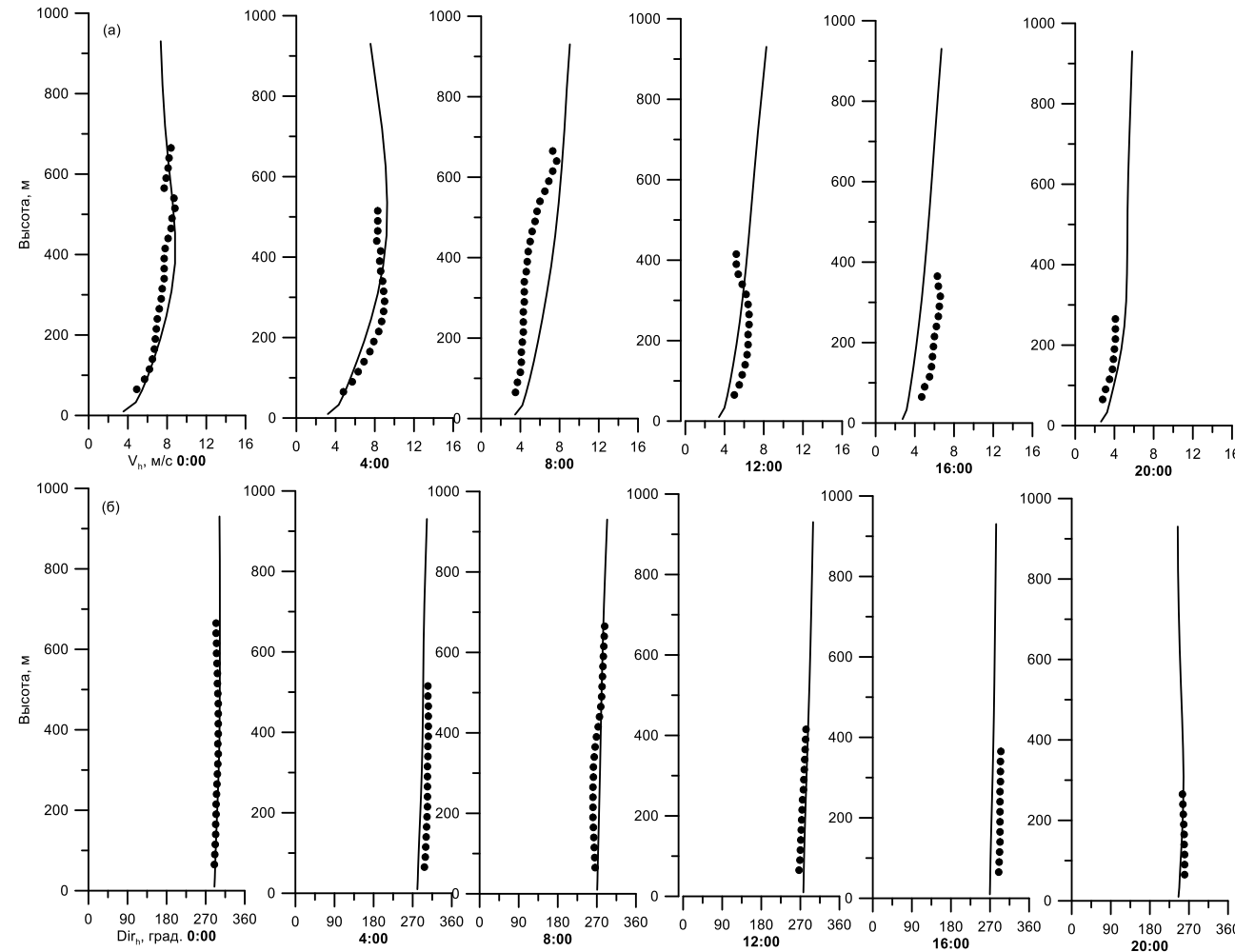
Сравнение с натурными наблюдениями



Рассчитанные (линии) и измеренные МТР-5 (значки) вертикальные профили приземной температуры над пунктом БЭК через 4 часа для 6 июня 2022 года

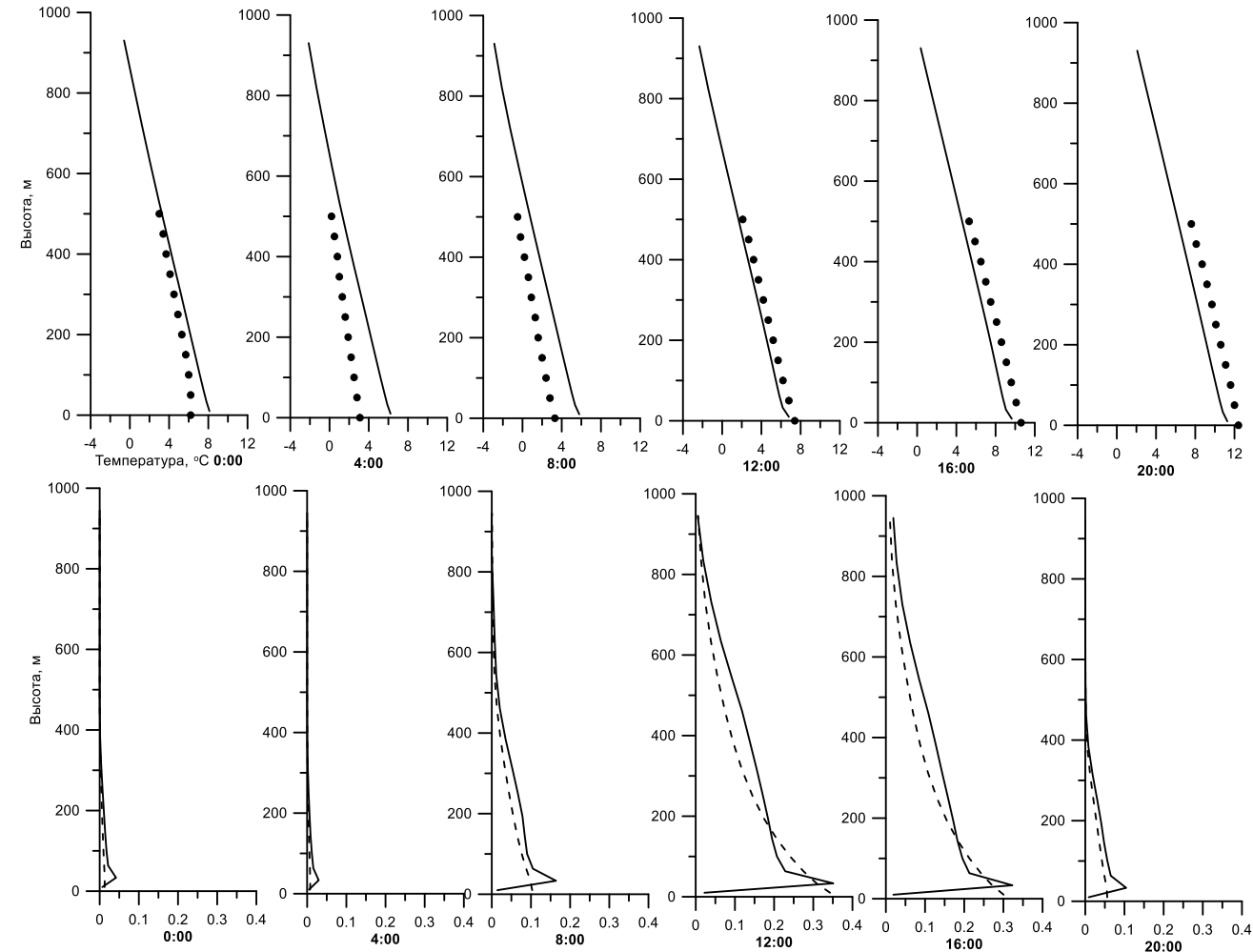
Сравнение с натурными наблюдениями

- Рассчитанные (линии) и измеренные содаром «Волна» (значки) вертикальные профили скорости (а) и направления (б) горизонтального ветра над пунктом БЭК через 4 часа для 6 июня 2022 года



Сравнение с натурными наблюдениями

- Рассчитанные вертикальные профили температуры, турбулентного теплового потока (сплошная линия) и квадрата пульсаций температуры (штриховая) над пунктом БЭК через 4 часа для 6 июня 2022 года



Заключение

- Для исследования турбулентной структуры атмосферного пограничного слоя с высоким разрешением ($\Delta x \sim l$) разработана нестационарная трехмерная модель турбулентности $k-l-\langle \theta^2 \rangle$. В вычислительном плане такая модель по сравнению с LES-подходом обладает высокой численной эффективностью.
- Предлагаемая турбулентная параметризация была применена в мезомасштабной модели TSUNM3 для изучения термической турбулентной структуры для устойчиво стратифицированного АПС (10.02.2022) и неустойчивого АПС (6.06.2022) для реальных погодных условий Западной Сибири.
- Результаты расчетов сравнивались с измерениями метеостанций «Метео-2», температурного профилера МТР-5 и содара БЭК ИОА СО РАН. Краткосрочный прогноз параметров атмосферного пограничного слоя был выполнен с помощью мезо-масштабной модели TSUNM3 с оригинальной параметризацией турбулентности с разрешением 1 км.
- Сравнение расчетов с измерениями показало, что модель хорошо прогнозирует вертикальные профили температуры, скорости и направления горизонтального ветра, однако для условий, когда поверхность покрыта снегом, необходимо проведение дальнейших исследований по учету в модели взаимодействия АПС с поверхностью.