



Всероссийская конференция, посвященная памяти академика
Александра Михайловича Обухова
«Турбулентность, динамика атмосферы и климата»

Сравнение результатов мезомасштабного и вихреразрешающего моделирования с данными наблюдений в пограничном слое атмосферы

(РНФ № 22-17-00053)

С.В. Анисимов, Е.А. Мареев, С.В. Галиченко,
А.А. Прохорчук, Е.В. Климанова, А.С. Козьмина,
К.В. Афиногенов, А.В. Гурьев

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН
Геофизическая обсерватория «Борок»
Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН

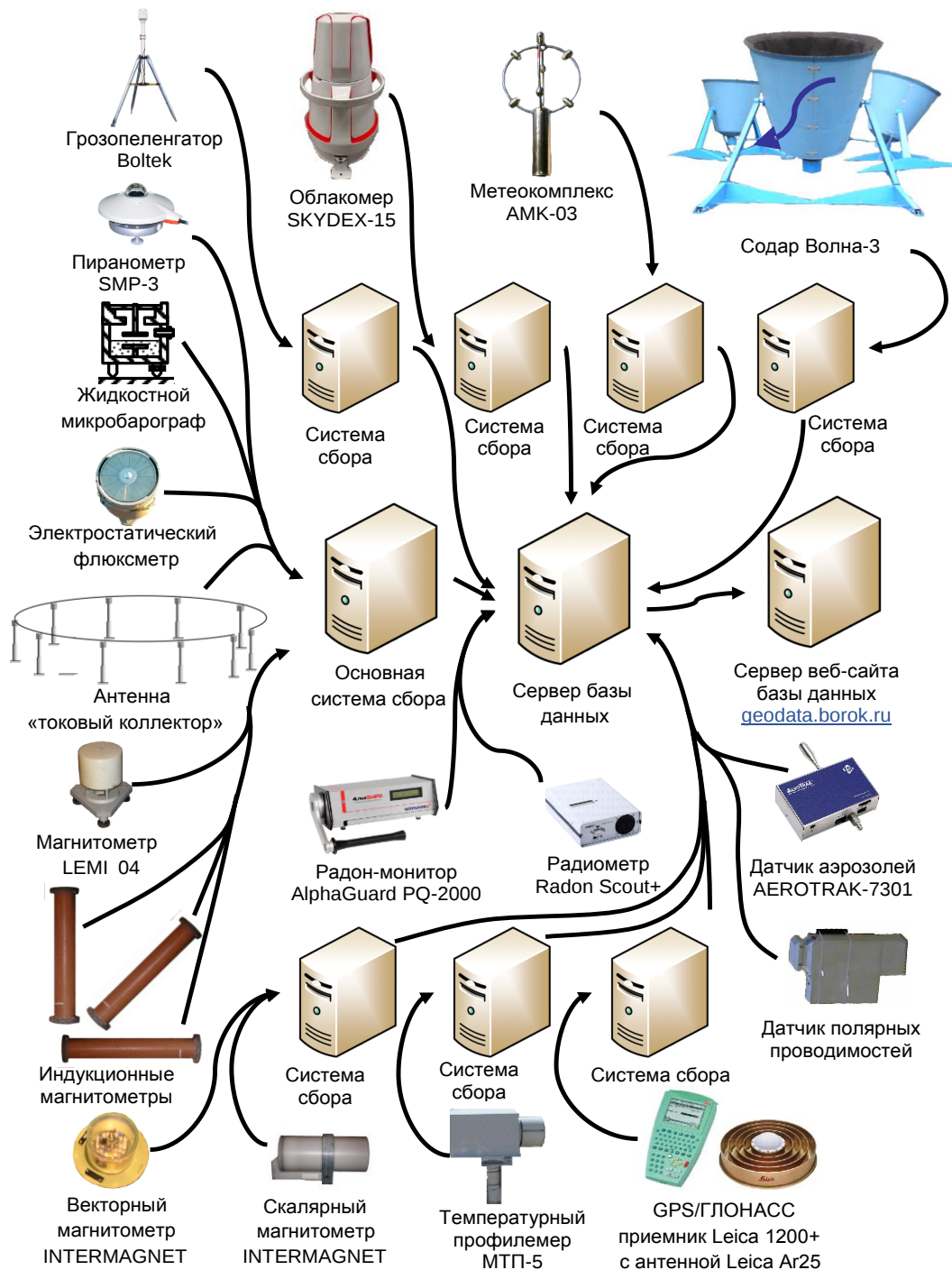


Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН

(58° 04' с.ш., 38° 14' в.д.)

измерительный комплекс и сеть сбора данных

<http://geodata.borok.ru/database/index>



Инструменты и методы измерений

СОДАР "Волна-3"



**Температурный
профилемер "МТП-5"**



**Ультразвуковая
метеостанция
"Метео-2Н"**



Пиранометр СМРЗ



Размеры доменов, параметры сетки и величина временного шага WRF и LES

Модель	Домен	Количество ячеек в горизонтальной плоскости $N_x \times N_y$	Количество вертикальных уровней N_z	Длина стороны ячеек в горизонтальной плоскости, км	Высота домена, км	Временной шаг Δt , с
WRF	D ₁	200×200	50	9	19.892	45
WRF	D ₂	120×120	50	3	19.892	15
WRF	D ₃	90×90	50	1	19.892	5
LES	D ₄	192×192	64	0.09	3.072	0.284 - 1
LES	D ₅	192×192	192	0.03	2.304	0.284 - 1

Для мезомасштабного моделирования WRF выбраны три области. Во внешнюю область D₁ с размерами 1800 × 1800 км², покрывающую европейскую часть России и имеющую шаг сетки 9 км вложена промежуточная область D₂ с размерами 360 × 360 км² и шагом сетки 3 км. Вложенная в D₂ внутренняя область D₃ с размерами 90 × 90 км² имеет шаг сетки 1 км. Все перечисленные сетки имеют совпадающие 50 уровней в вертикальном направлении до давления в 5 кПа. Центры расчётных областей совмещены и соответствуют расположению измерительного комплекса ГО «Борок» ИФЗ РАН (58.070531 с.ш., 38.232595 в.д.).

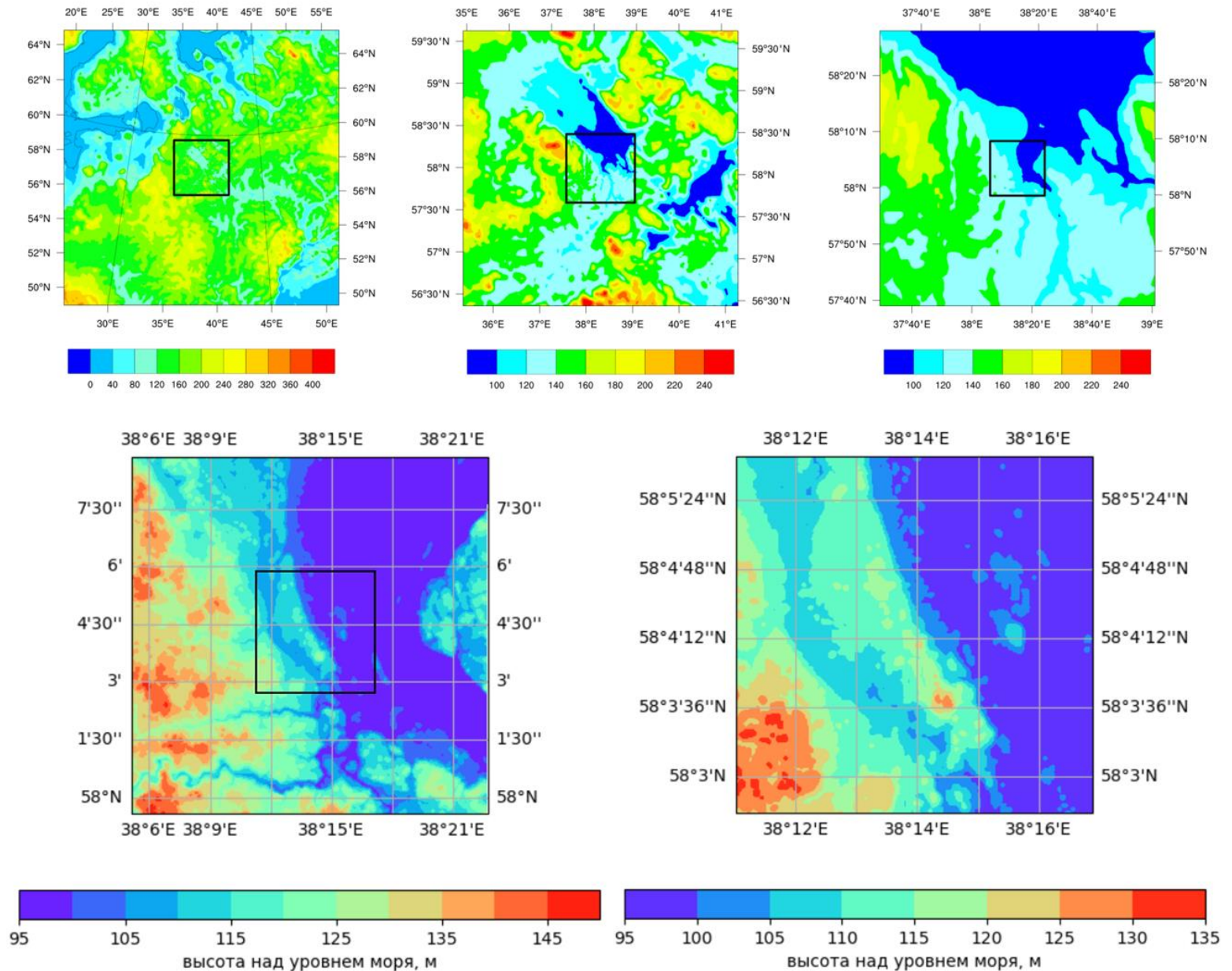
Дальнейшее увеличение разрешения достигается за счёт вложения в область D₃ мезомасштабной модели двух областей D₄ и D₅, в которых выполняется вложение одной области LES в другую, и расчёты проводятся одновременно в обеих областях [Hellsten et al., 2021].

Схемы параметризации процессов WRF

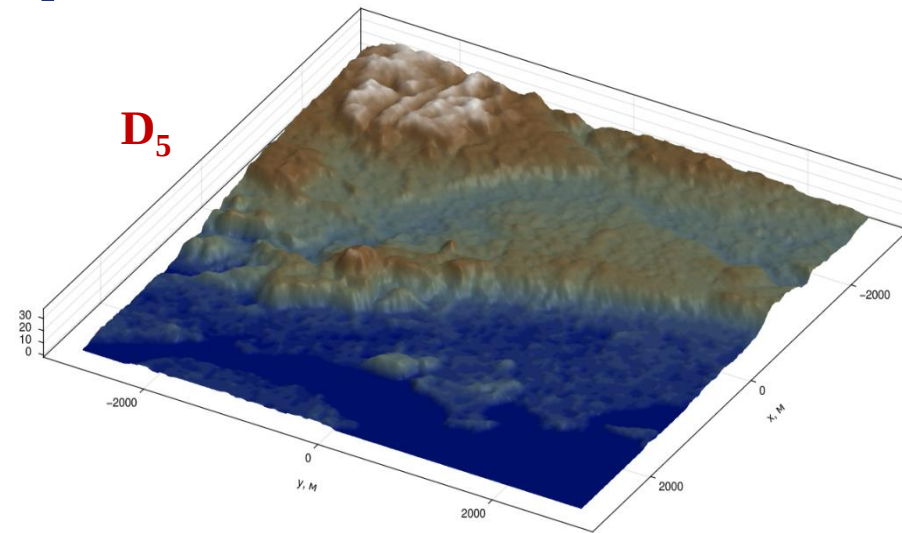
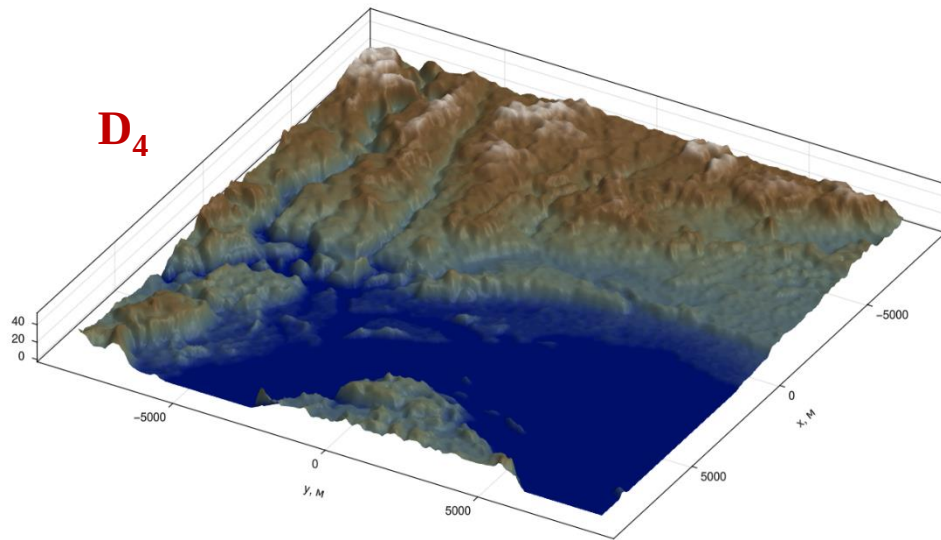
Процесс	Параметр WRF	Название параметризации	Ссылка
Облачная микрофизика	MP_PHYSICS=8	Схема Томпсона	[Thompson et al., 2008]
Длинноволновая радиация	RA_LW_PHYSICS=4	Схема RRTMG	[Iacono et al., 2008]
Коротковолновая радиация	RA_SW_PHYSICS=4	Схема RRTMG	[Iacono et al., 2008]
Приземный слой	SF_SFCLAY_PHYSICS=2	Схема Монины-Обухова с оптимизацией Зилитинкевича	[Janjić, 1994]
Поверхность	SF_SURFACE_PHYSICS=2	Модель Noah	https://ral.ucar.edu/document-or-file/noah-lsm-users-guide [He et al., 2023]
Планетарный пограничный слой	BL_PBL_PHYSICS=2	Схема Меллора-Ямады-Яника	[Janjić, 1994]
Конвекция	CU_PHYSICS=1	Схема Кейна-Фрича	[Kain, 2004]

Набор параметризаций WRF использует рекомендуемые для мелких сеток параметры с уменьшенным временем вызова модулей параметризации радиационного баланса RRTMG (RADT = 10 мин). Время вызова блока конвекции CUDT = 10 мин. В качестве начальных и граничных условий используются данные глобальной прогнозной модели GFS с разрешением 0.25°: NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive (ds084.1, <https://doi.org/10.5065/D65D8PWK>). Параметризация поверхности выполнена с использованием Noah Land Surface Model: Unified NCEP/NCAR/AFWA (<https://ral.ucar.edu/model/unified-noah-lsm>) [He et al., 2023]. Начало расчётов в 18.00 UTC предыдущих суток. Результаты первых 12 ч расчетного периода для анализа не использовались.

. Схема вложения расчётных областей D₁-D₅



Рельеф

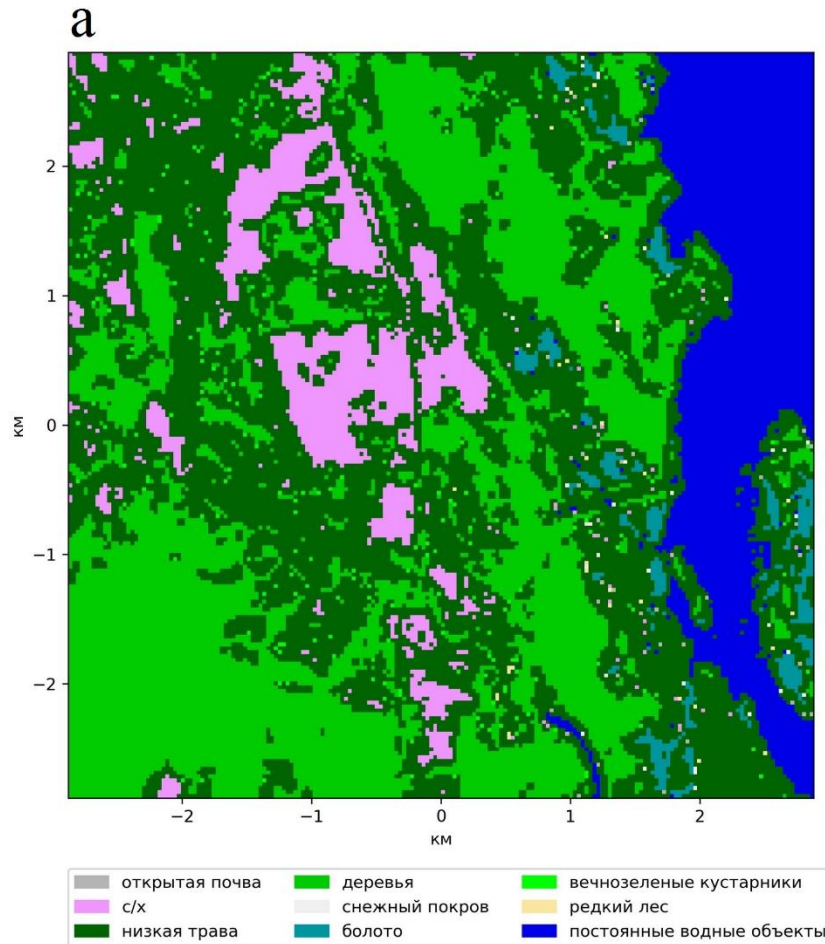


Топографическая карта земной поверхности в области D_5 задается с использованием интерполированных значений цифровой карты высот с разрешением 30×30 м² (Digital Elevation Model), полученных в ходе спутникового зондирования Shuttle Radar Topography Mission (<https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl1v003>, <https://srtm.csi.cgiar.org>).

Сила сопротивления, действующая на течение со стороны возвышений рельефа поверхности, учитывается с помощью дополнительного слагаемого в правой части уравнения динамики фильтрованных горизонтальных компонент скорости [Anderson and Meneveau, 2010]:

$$f_i(x, y, \Delta_z/2) = -\frac{U_i(x, y, \Delta_z/2)}{\Delta_z} U_k \frac{\partial h}{\partial x_k} H\left(U_k \frac{\partial h}{\partial x_k}\right), \quad i, k = 1, 2, \quad x_1 = x, \quad x_2 = y$$

Δ_z – расстояние между вертикальными уровнями, h – высота рельефа



Данные ESA WorldCover (<https://esa-worldcover.org/en>), подготовленные с помощью статического драйвера PALM.

Турбулентные потоки тепла и удельной влажности на нижней границе определяются на основе встроенной в PALM модели земной поверхности в соответствии с изменяющимся потоком приходящего коротковолнового солнечного излучения, высотой и положениями неоднородностей земной поверхности, включая водные объекты, а также физическими свойствами почвы и растительности.

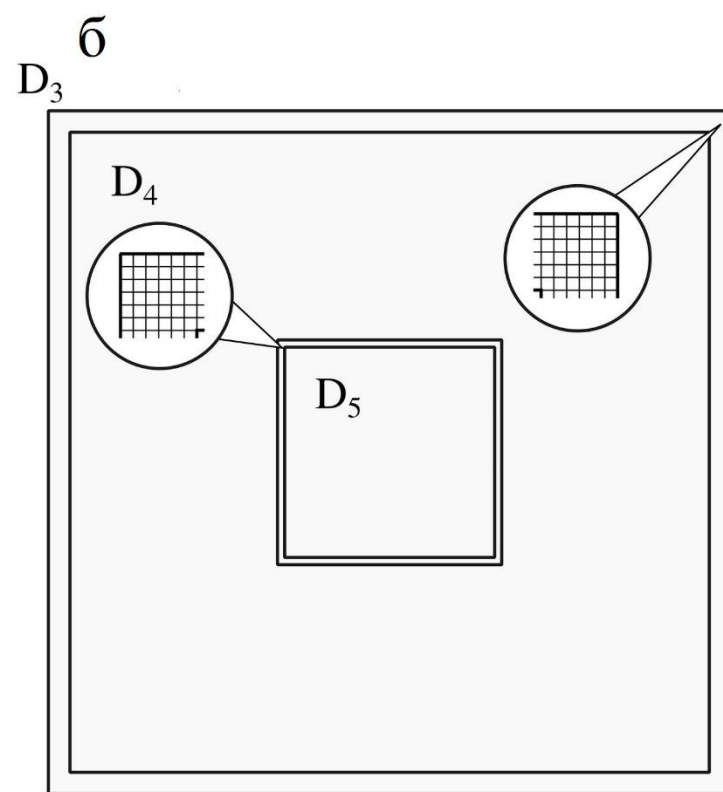
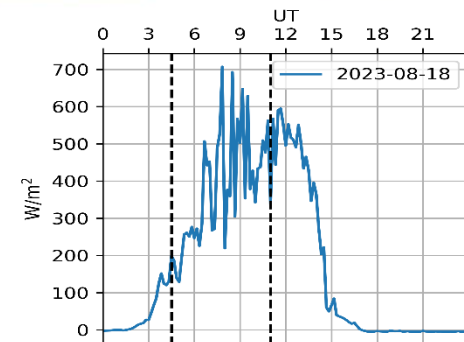
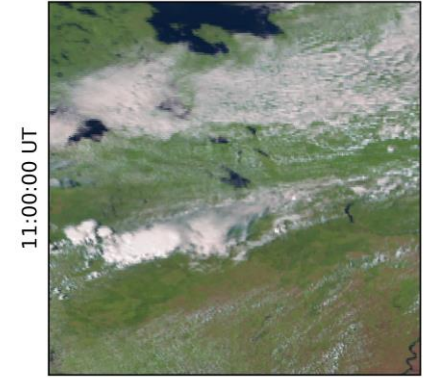
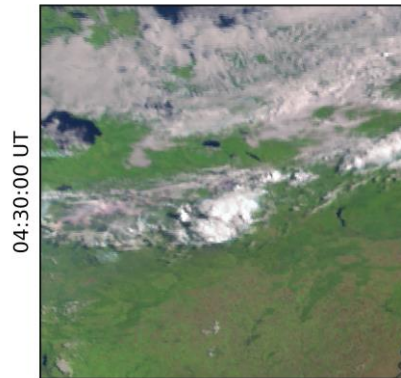
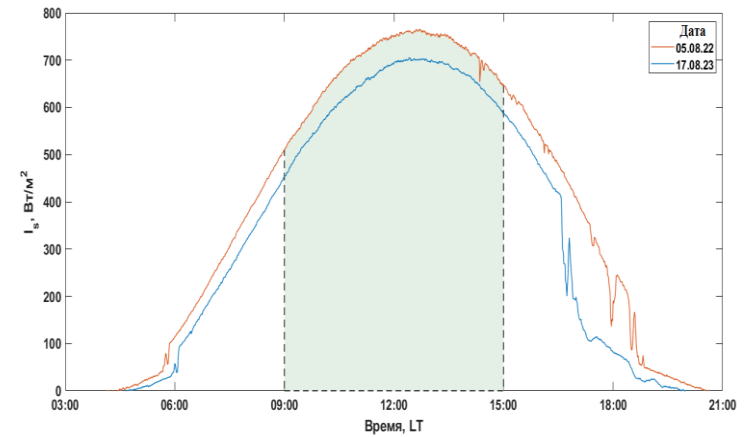
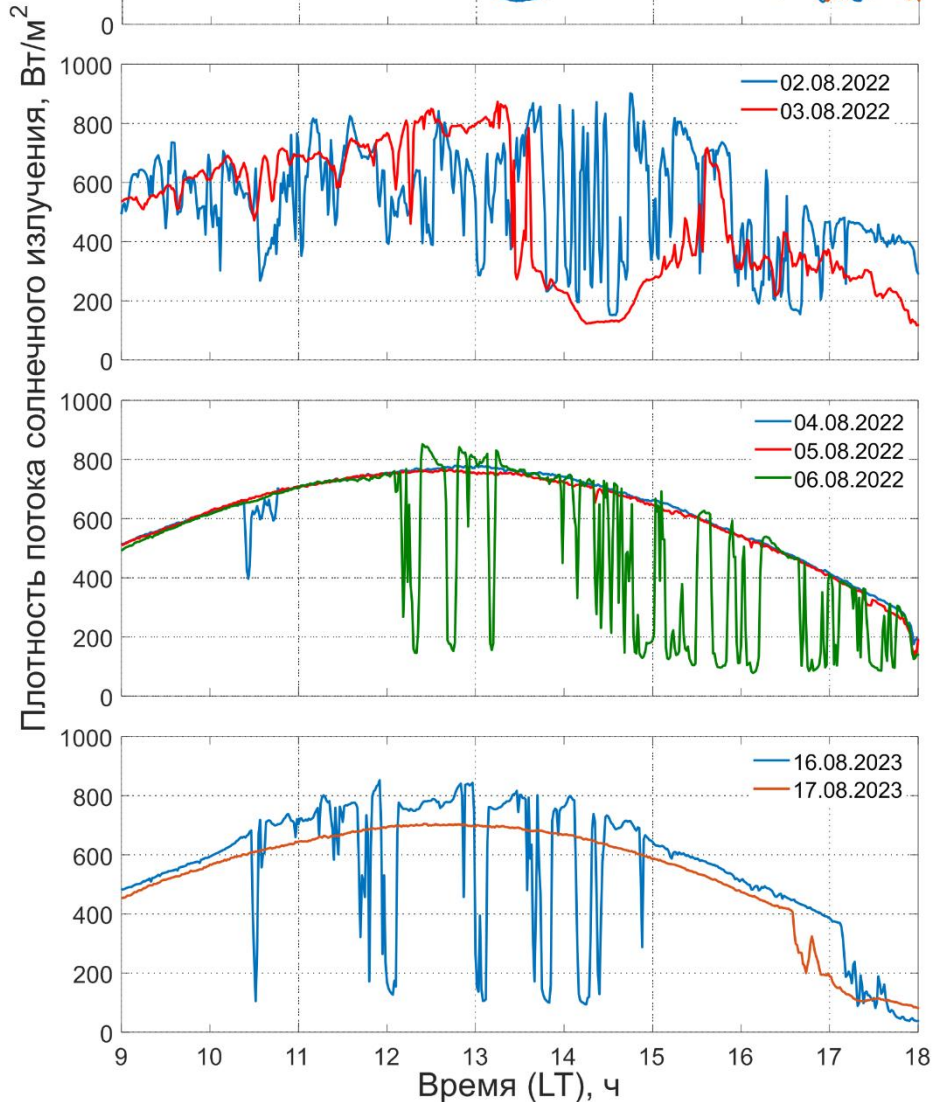


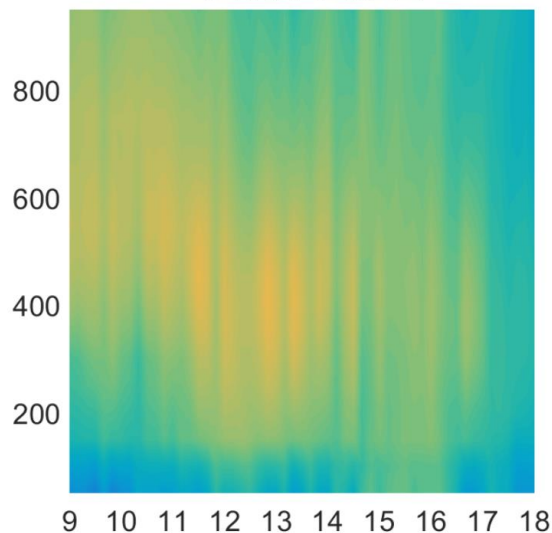
Схема расположения ячеек, в которых применяется метод возбуждения турбулентности, основанный на добавлении в уравнение для потенциальной температуры стохастического источника [DeLeon et al., 2019; Senocak and DeLeon, 2023], для параметризации статистики флуктуаций которого использовались временные ряды наблюдений температуры на высоте 2 м от земной поверхности.

Плотность потока приходящего коротковолнового солнечного излучения

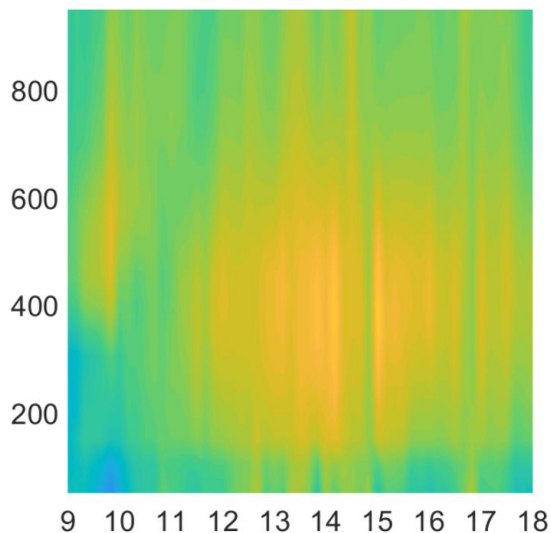


**Разность высотных профилей температуры, рассчитанных в модели
WRF и измеренных профилемером МТП-5 с 10-мин усреднением**

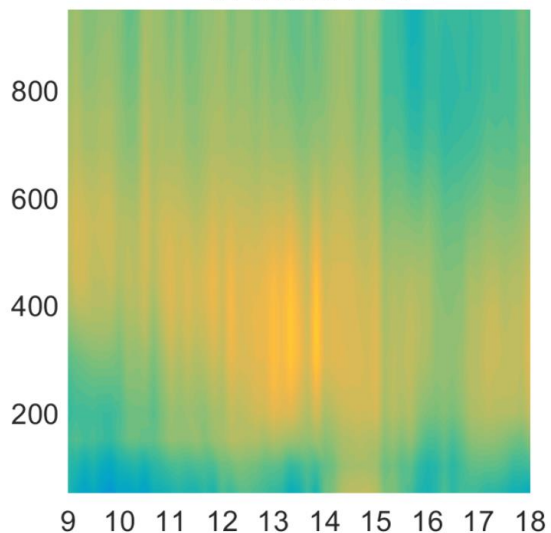
31.07.2022



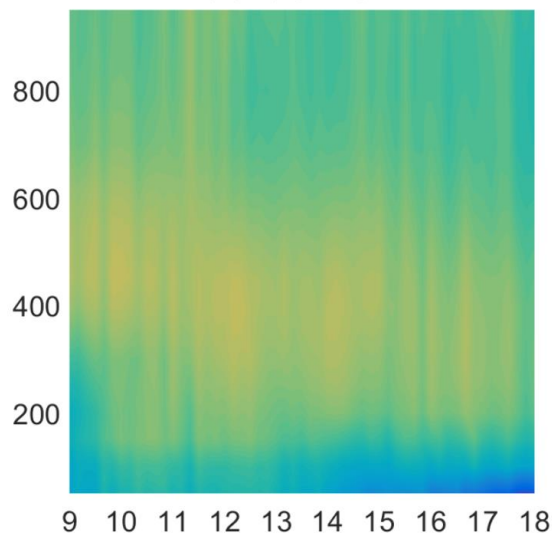
01.08.2022



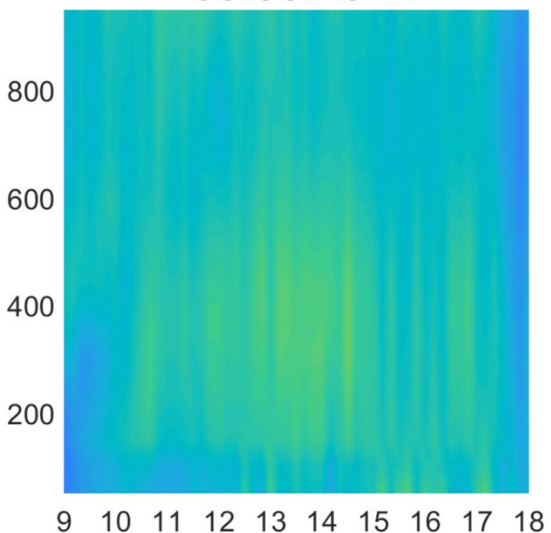
02.08.2022



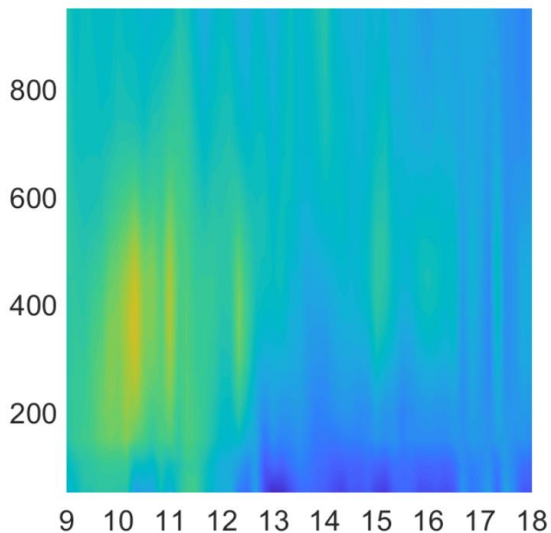
03.08.2022



05.08.2022



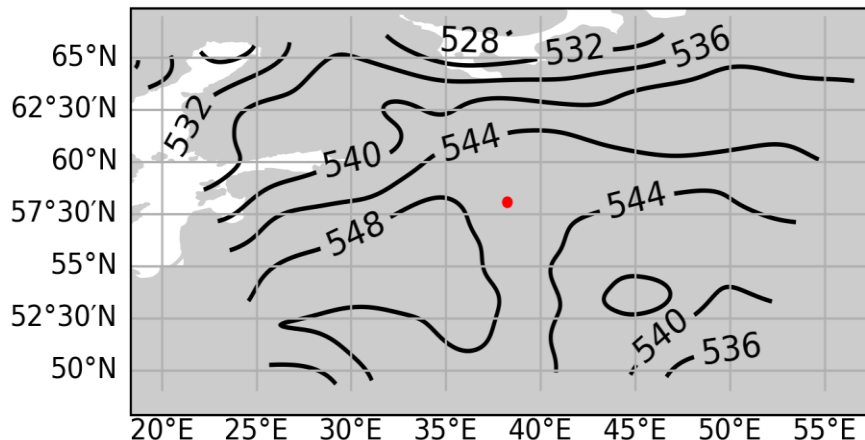
06.08.2022



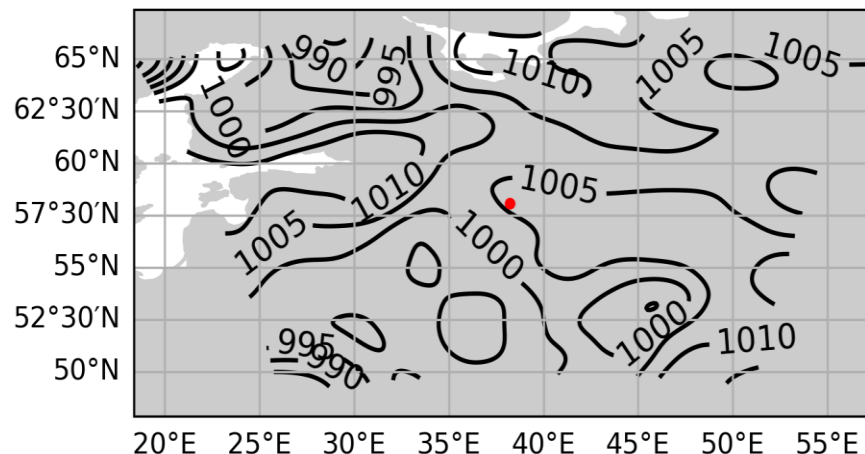
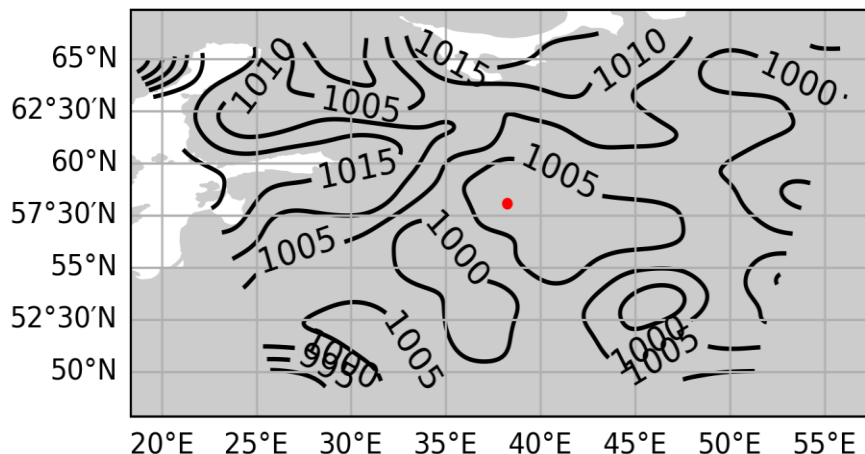
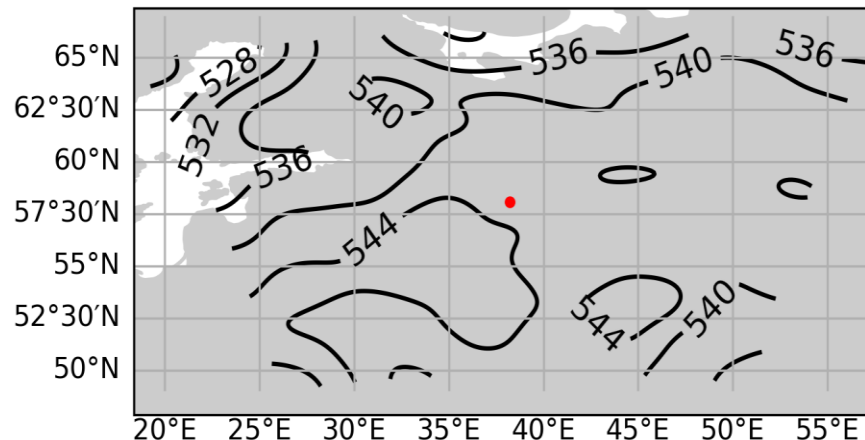
$\Delta T, K$

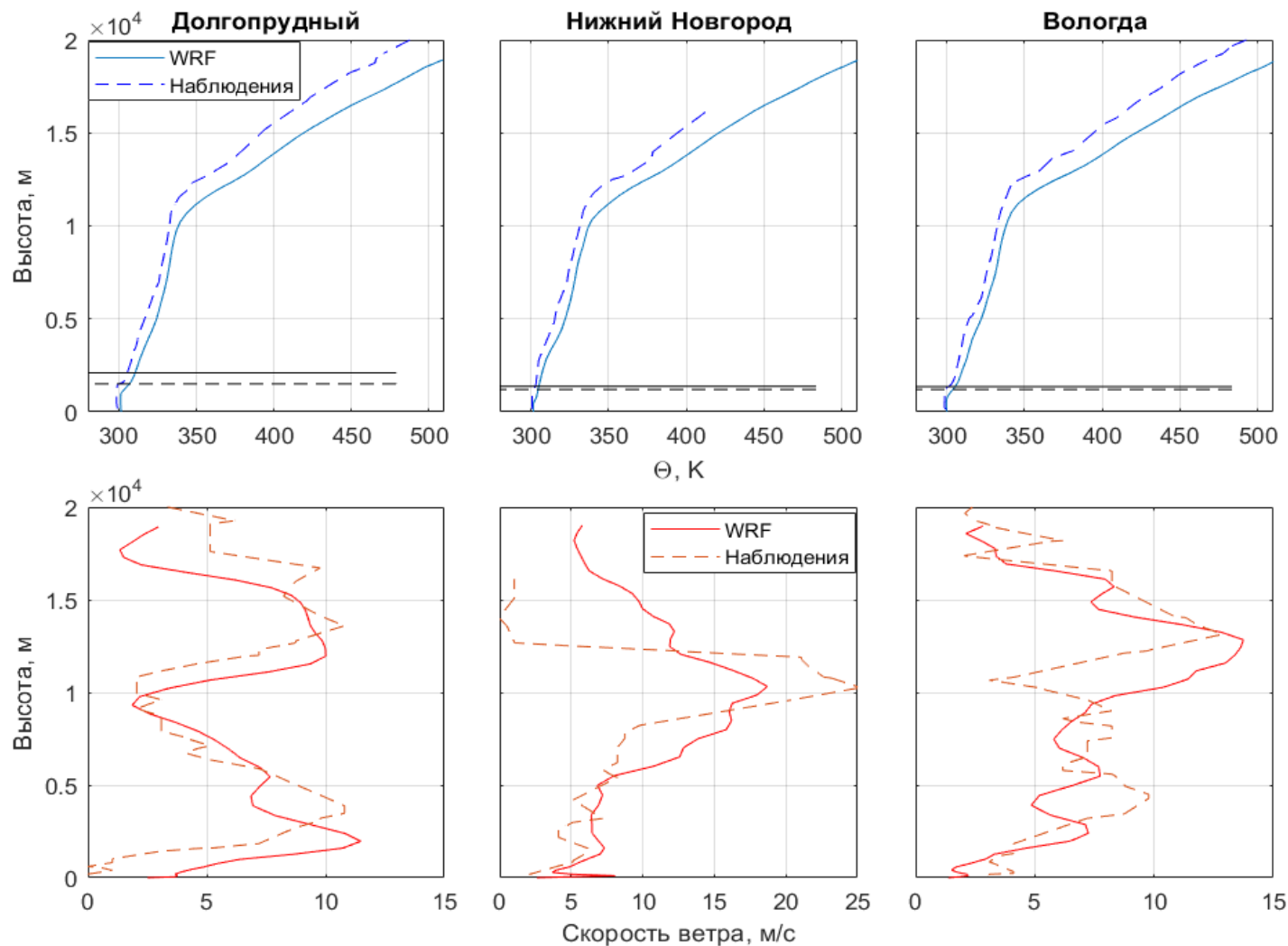
Рассчитанные WRF распределения геопотенциальной высоты на уровне 500 гПа (верхний ряд) и атмосферного давления на уровне земной поверхности (нижний ряд) в 12 ч по местному времени (точка показывает положение Геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН)

2023-08-17T12:00:00 LT

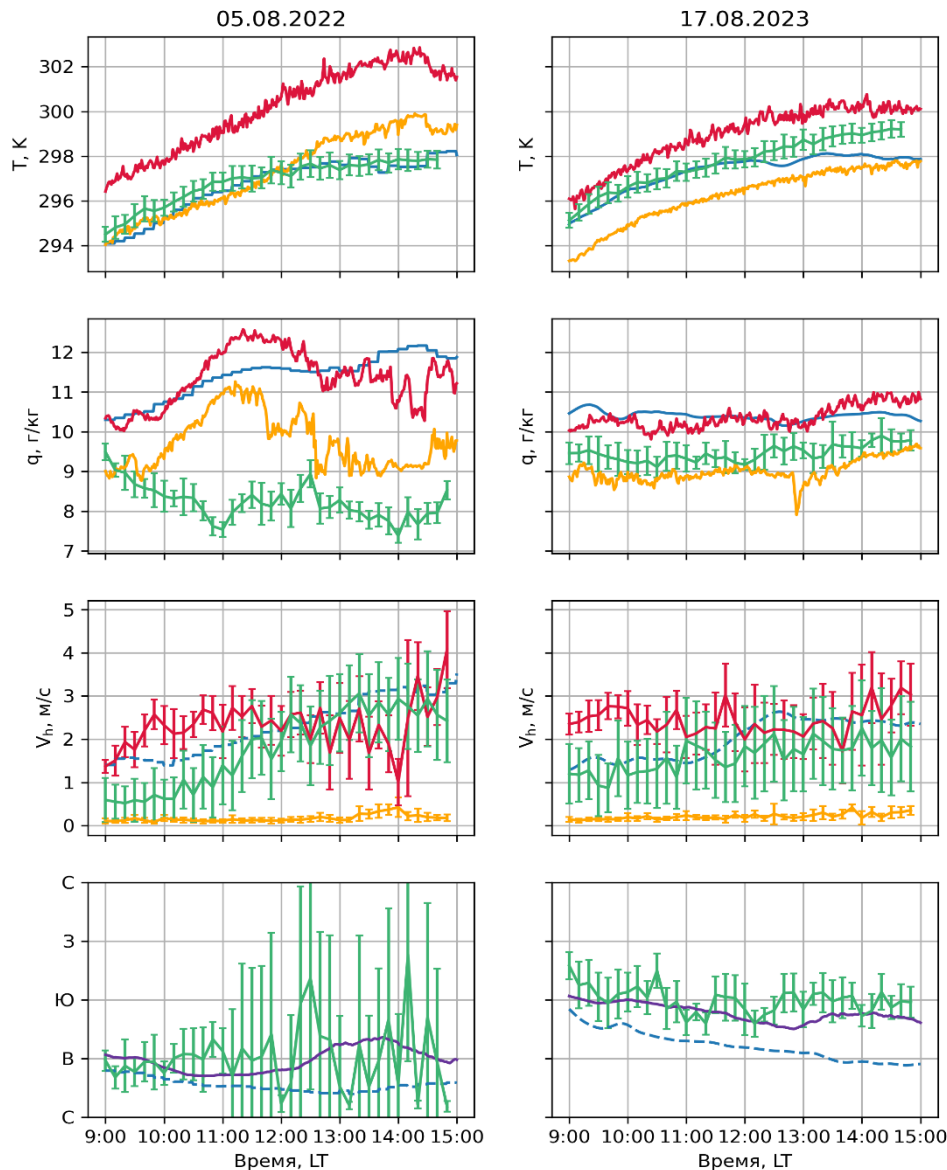
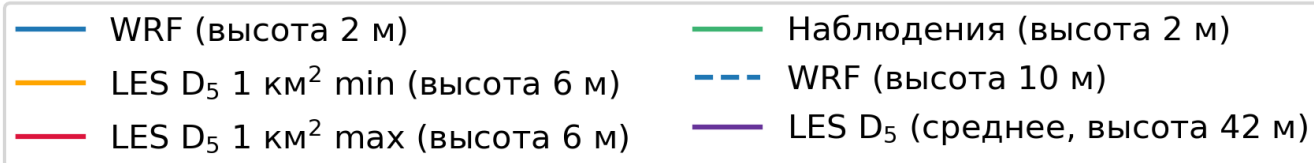


2022-08-05T12:00:00 LT



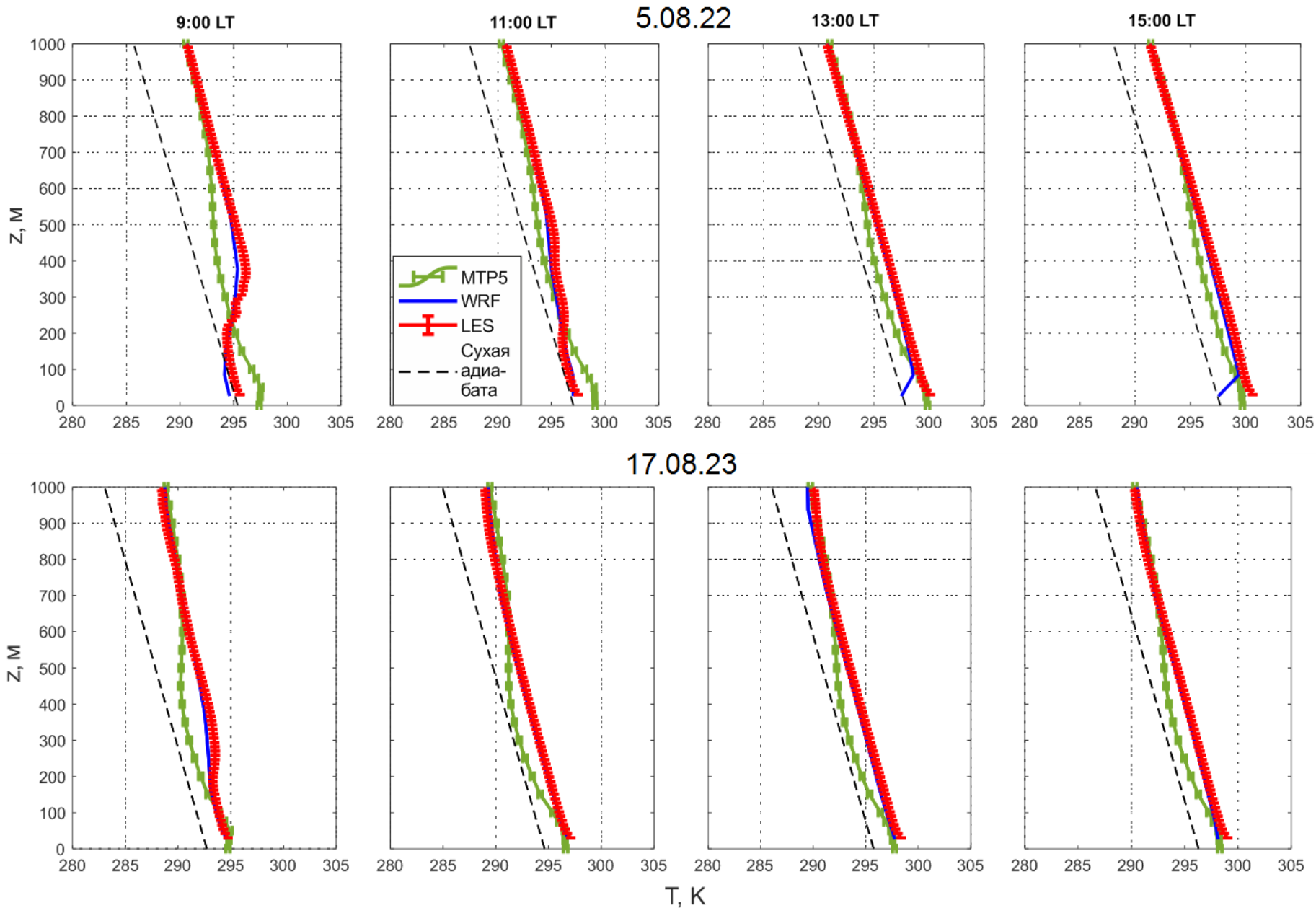


Рассчитанные в домене D_1 модели WRF высотные профили потенциальной температуры и модуля горизонтальной скорости ветра в сравнении с данными зондирования атмосферы Университета Вайоминга (<https://weather.uwyo.upperair>) на станциях 27713 - Москва (Долгопрудный), 27038 - Вологда и 27459 - Нижний Новгород 12 UTC 17.08.2023; горизонтальные линии на графиках температуры показывают высоту АПС

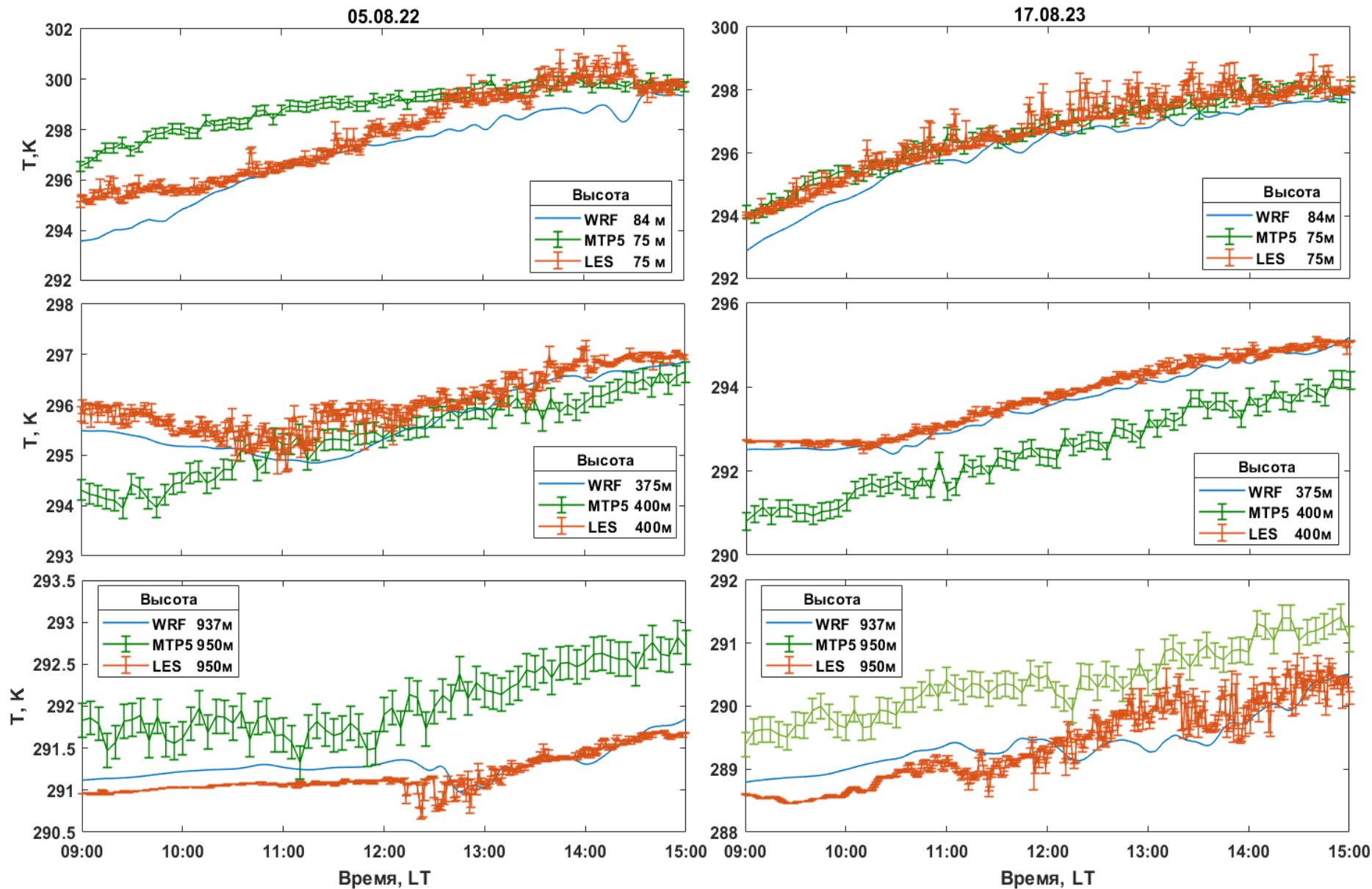


Результаты моделирования и наземных наблюдений температуры (T), удельной влажности (q), модуля (V_h) и направления горизонтальной скорости ветра; min и max показывают мгновенные экстремальные значения в квадрате площадью 1 км² в центре D₅, направление ветра LES усреднено по указанному квадрату; высота 42 м отсчитывается от нижней границы D₅, совпадающей с уровнем реки и находится выше всех неоднородностей рельефа в D₅ (перепад высот в D₅ составляет 42 м, медианная высота в D₅ от нижней границы – 10 м)

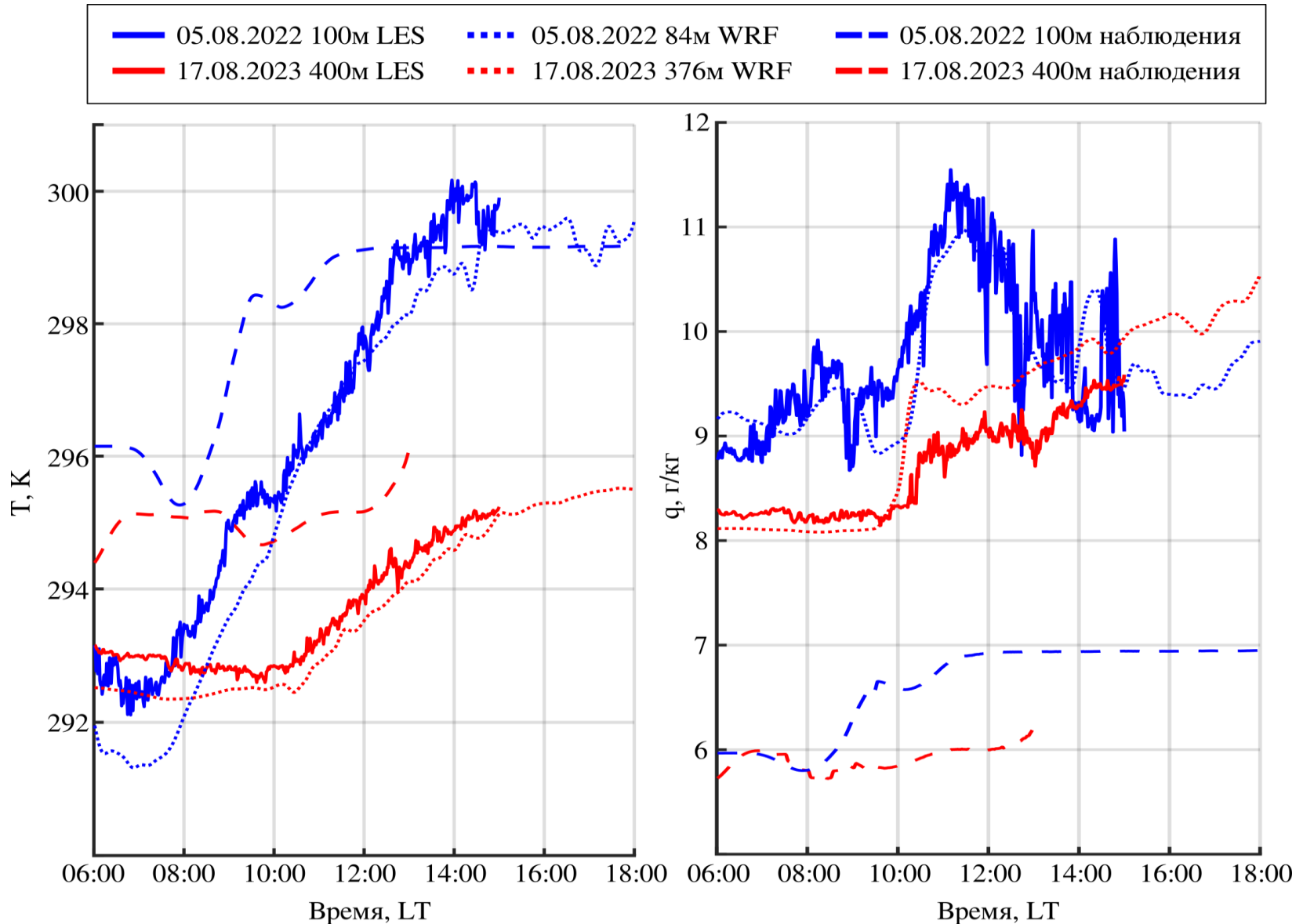
Модельные и измеренные МТП-5 высотные профили температуры с усреднением 5 мин



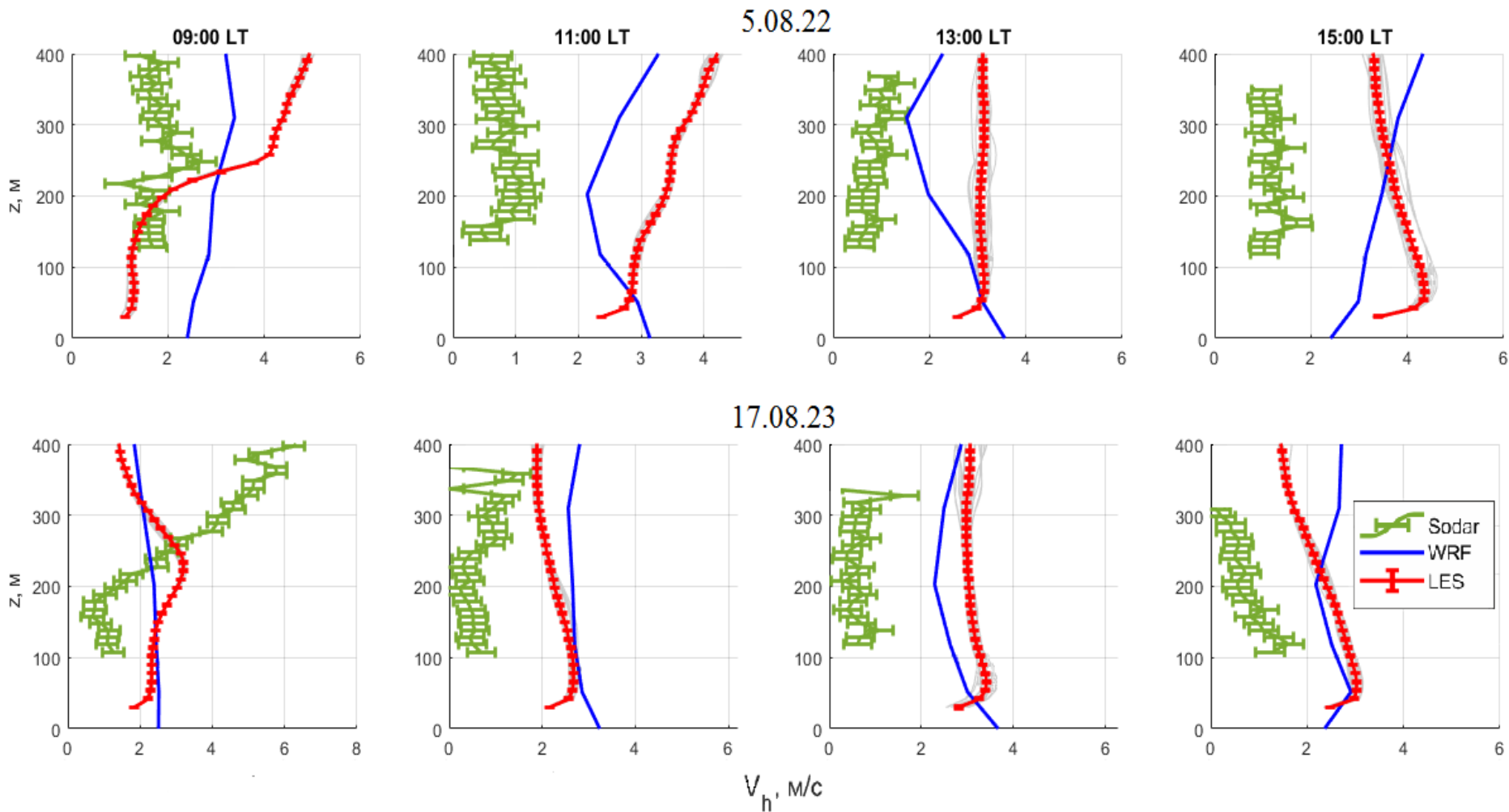
Модельная и измеренная МТР-5 температура на трёх уровнях высоты с усреднением 5 мин



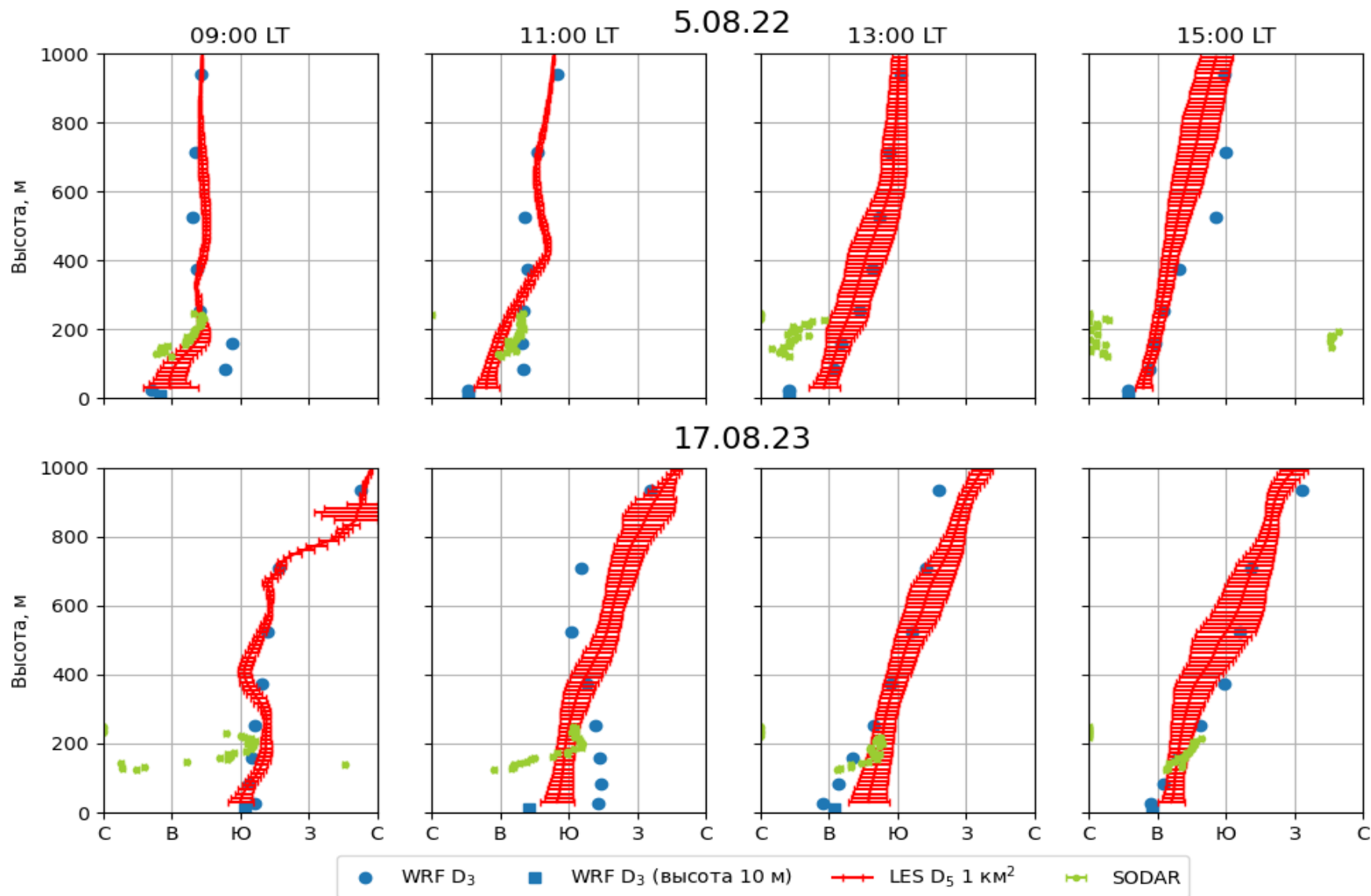
Температура и удельная влажность на двух уровнях высоты по данным аэростатных наблюдений с усреднением 40 мин, результатам WRF с усреднением 10 мин и LES с усреднением 1 мин



Высотные профили модуля горизонтальной скорости ветра по данным акустического зондирования (SODAR), результатам WRF и LES с усреднением 10 мин;
серые линии - мгновенные профили LES;
площадь усреднения результатов LES - 1 км²



Высотные профили направления горизонтальной скорости ветра по данным
 акустического зондирования, результатам WRF и LES с усреднением 10 мин;
 площадь усреднения результатов LES – 1 км²



Оценки отклонений

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (P_n - O_n)^2}$$

$$\text{IOA} = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N |P_n - O_n|}{\sum_{n=1}^N (|P_n - \bar{O}| + |O_n - \bar{O}|)}$$

Отклонения прогноза WRF от результатов наблюдений

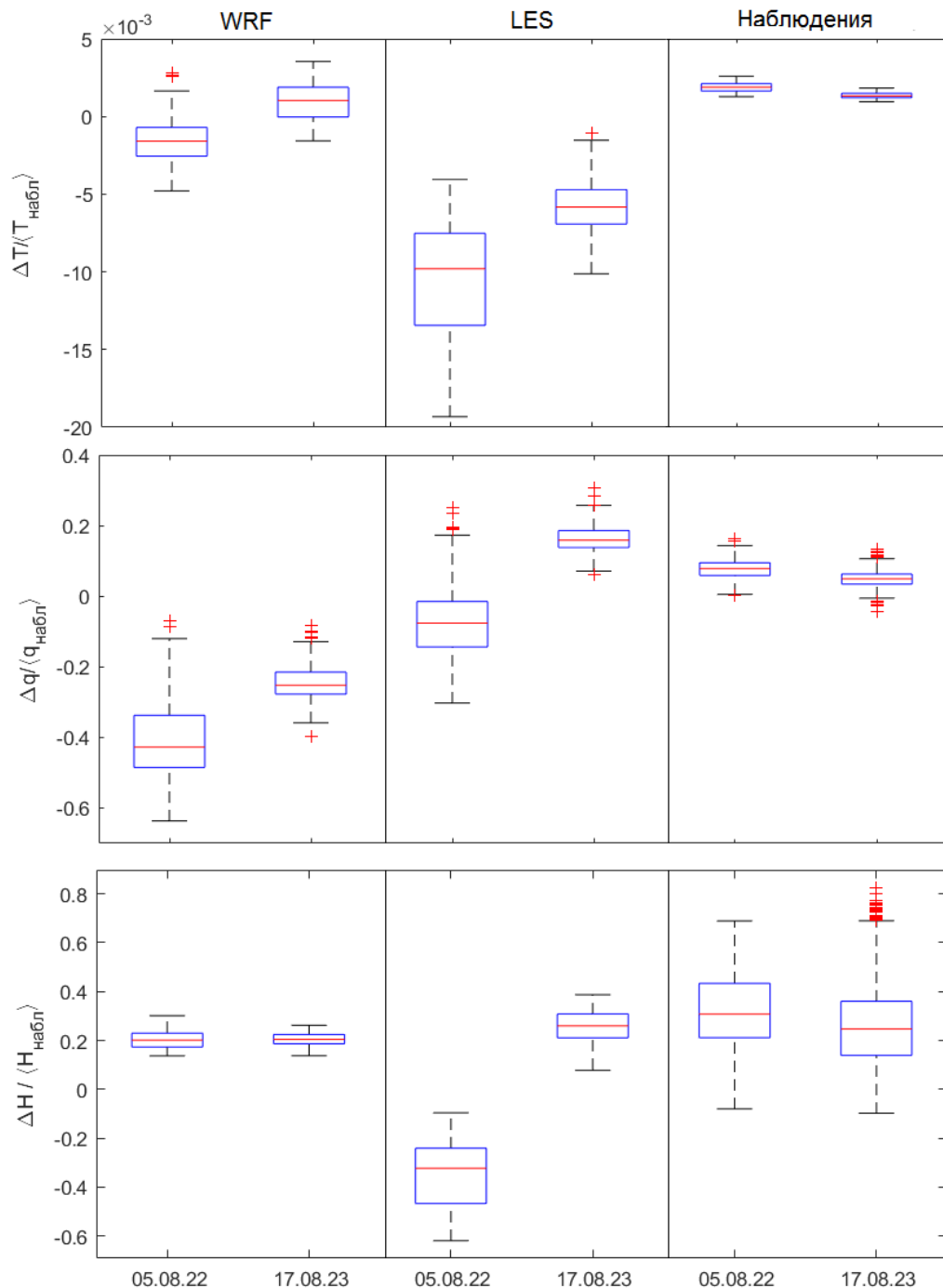
Дата	RMSE V_h [м/с]	IOA V_h	N	RMSE T [K]	IOA T	N
05.08.2022	0.65	0.52	798	0.81	0.87	828
17.08.2023	1.11	0.55	798	0.64	0.89	828

Отклонения прогноза LES от результатов наблюдений

Дата	RMSE V_h [м/с]	IOA V_h	N	RMSE T [K]	IOA T	N
05.08.2022	2.36	0.19	1440	0.65	0.89	1656
17.08.2023	1.95	0.34	1440	0.92	0.85	1656

Отклонения результатов разнесённых на расстояние L наземных наблюдений

Дата	L [м]	RMSE V_h [м/с]	IOA V_h	RMSE T [K]	IOA T	N
05.08.2022	2	0.23	0.86	0.50	0.95	1440
17.08.2023	4	0.19	0.84	0.44	0.96	1440

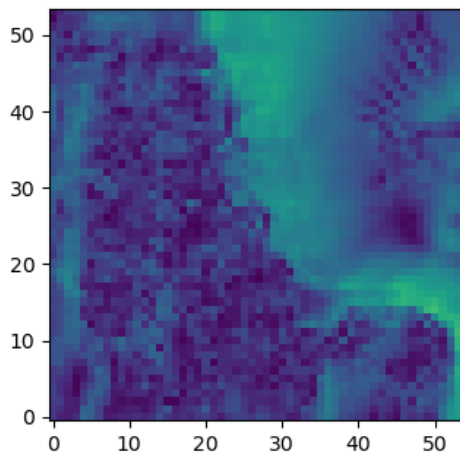


Диаграммы статистики относительных отклонений рассчитанных WRF и LES температуры (T), удельной влажности (q) и плотности вертикального турбулентного потока тепла (H) от измеренных с помощью ультразвуковых метеостанций и отклонений между результатами разнесённых измерений; периоды усреднения T и q - 1 мин, H - 20 мин.

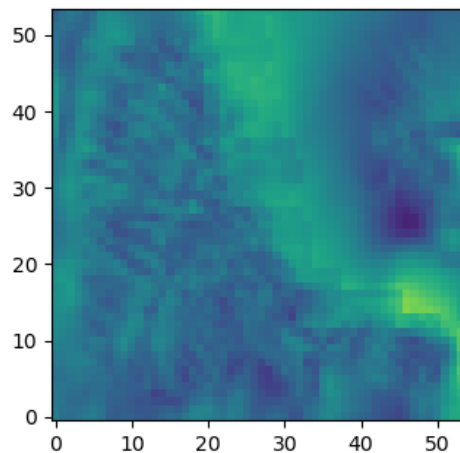
Вертикальная скорость

2023-08-17T11:30:00 - 2023-08-17T12:30:00 LT

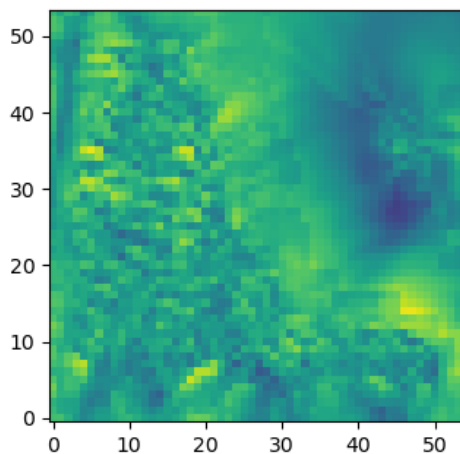
minimum



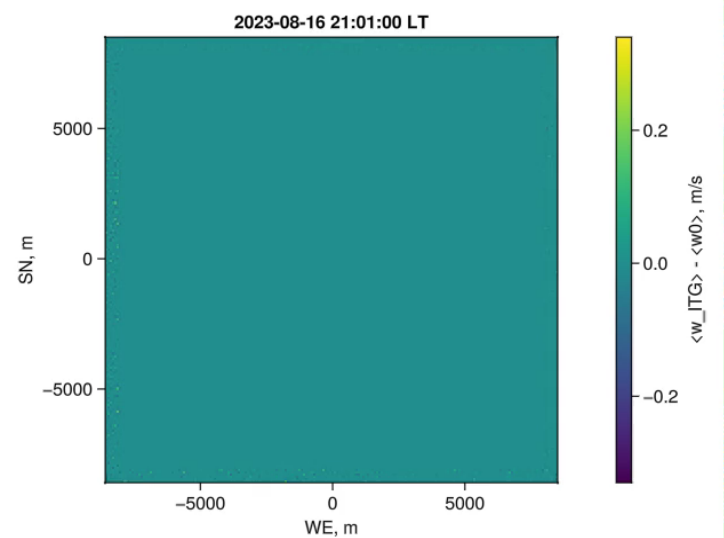
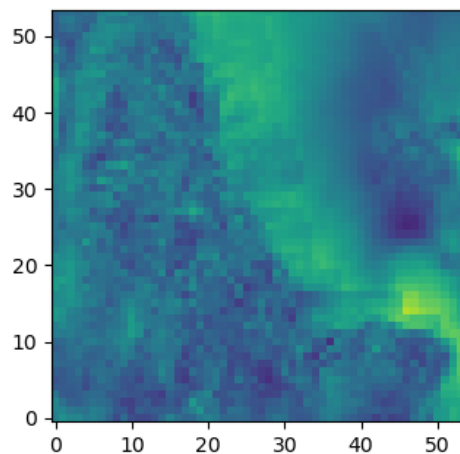
mean



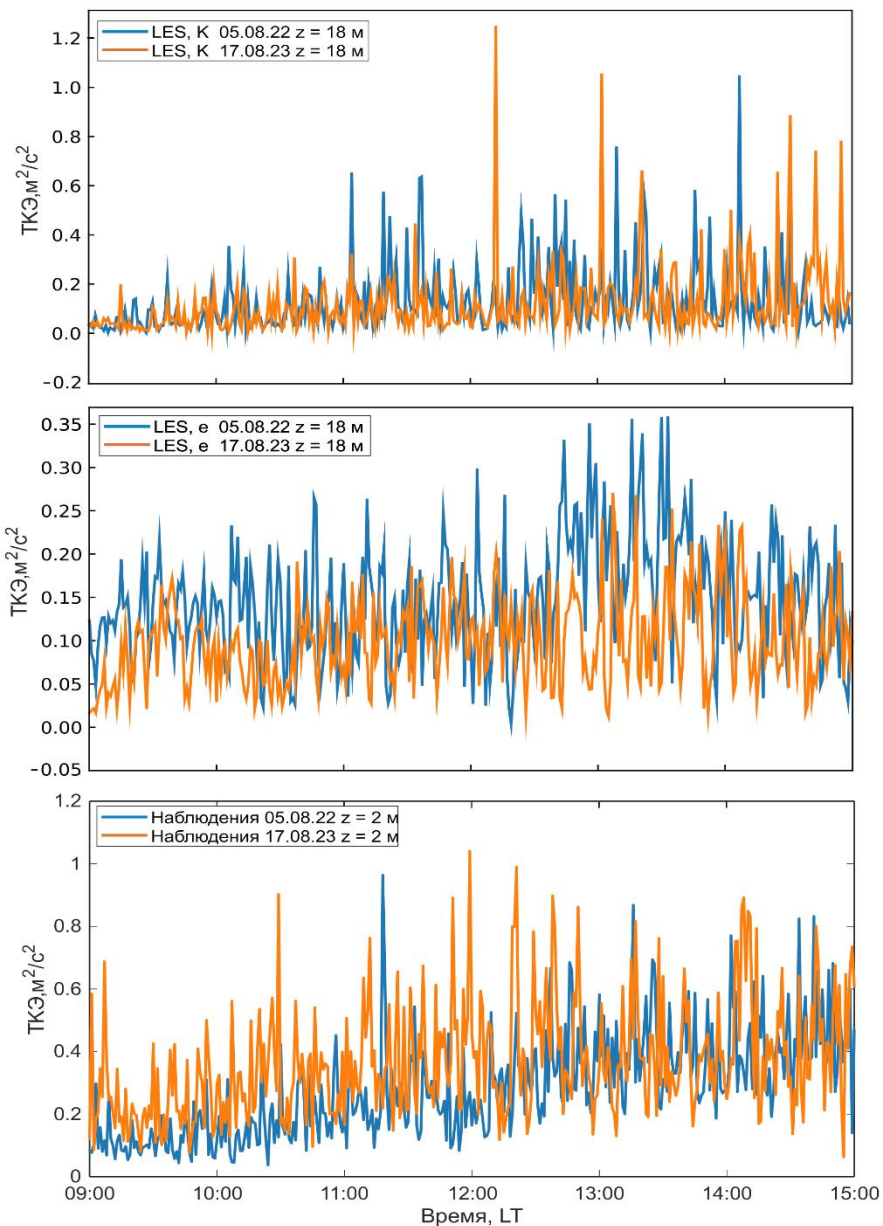
maximum



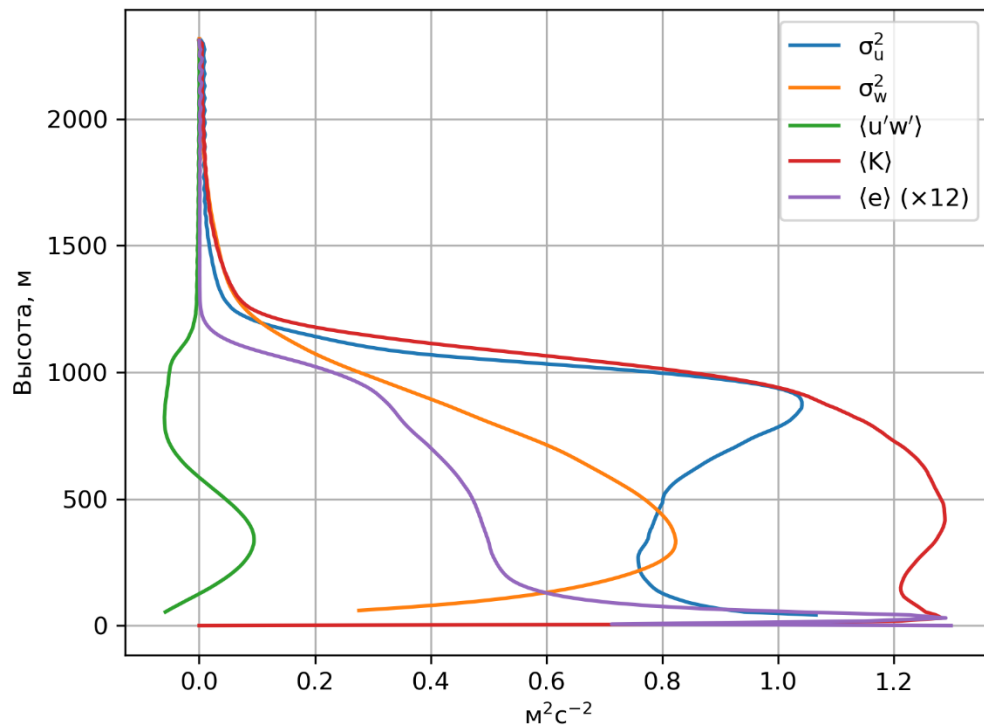
median



Вариации модельных явно разрешённой (К), подфильтровой (е) компонент и измеренной полной ТКЭ с усреднением 1 мин



**Высотные профили вторых моментов
турбулентных флуктуаций компонент
скорости ветра, явно разрешённой (К) и
подфильтровой (е) ТКЭ в LES с усреднением
по площади D_5 и по времени
с 11:30 до 12:30 LT 17.08.2023**

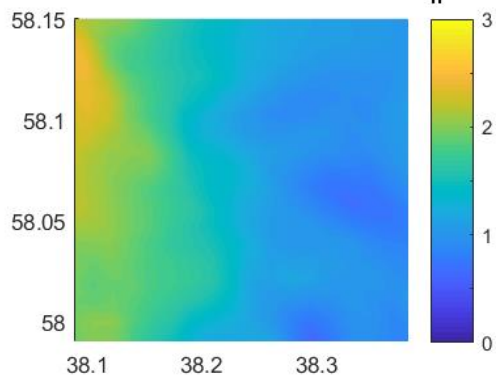
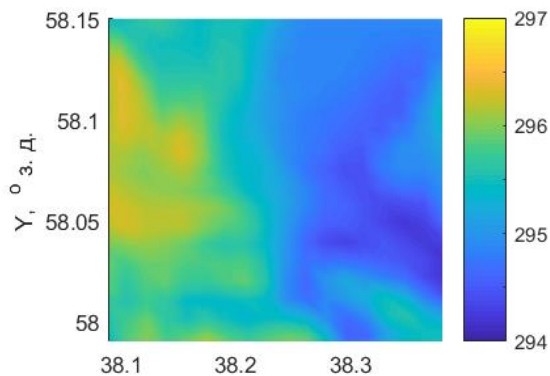


17.08.2023, 11:00 LT

D_3 WRF

T, K

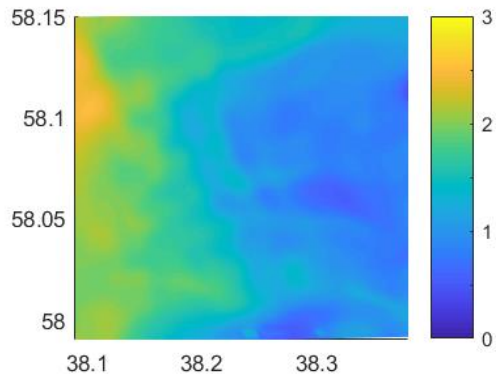
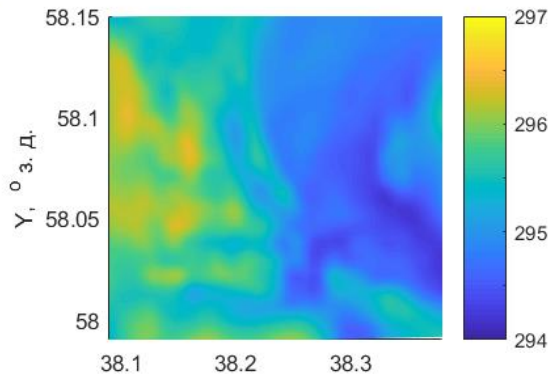
$V_h, m/c$



D'_4 WRF

T, K

$V_h, m/c$

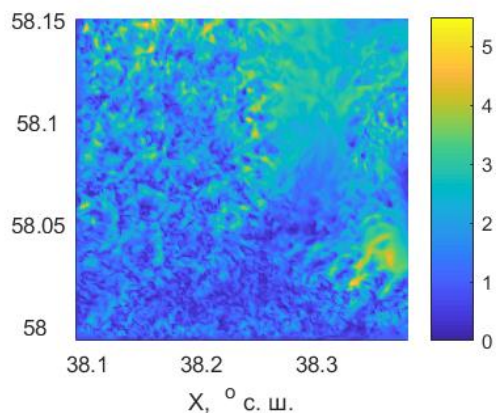
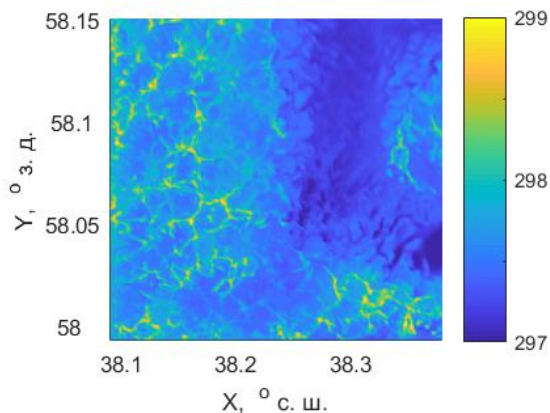


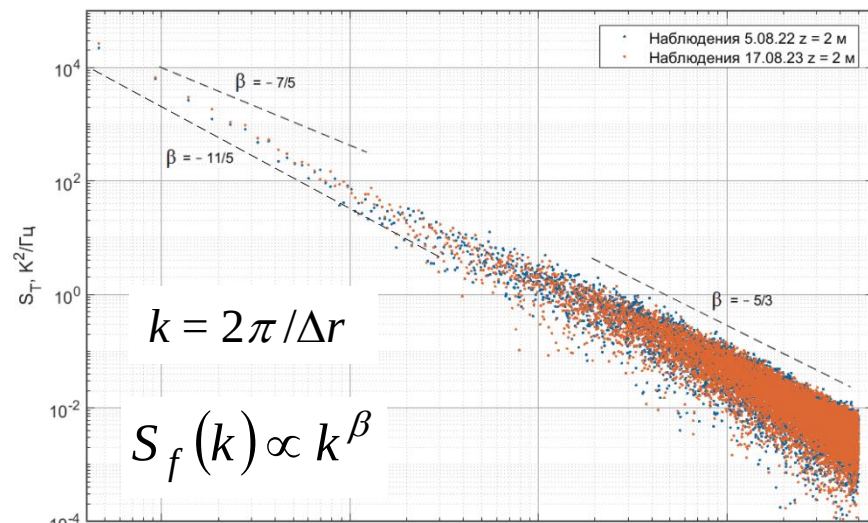
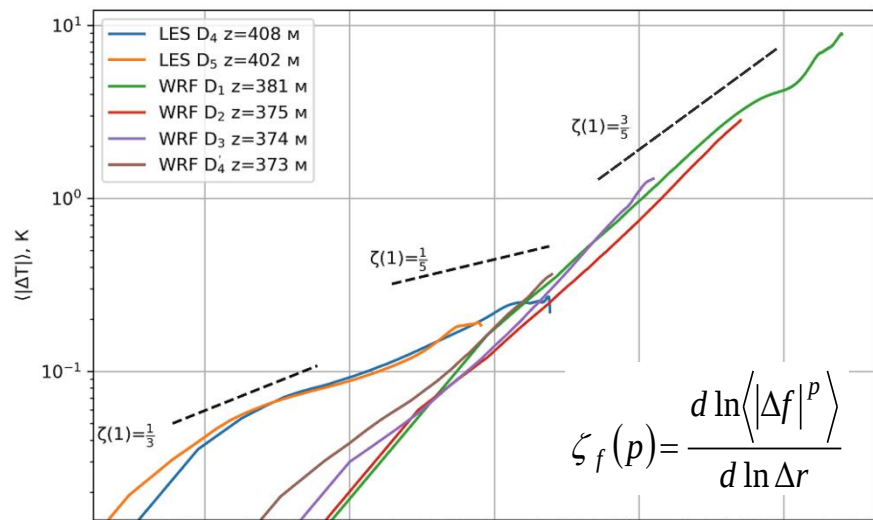
**Горизонтальные распределения
температуры и модуля
горизонтальной скорости ветра
WRF на сетках D_3 и D'_4 на
высоте 160 м и LES на сетке D_4
на высоте 168 м в 11 ч 17.08.2023**

D_4 LES

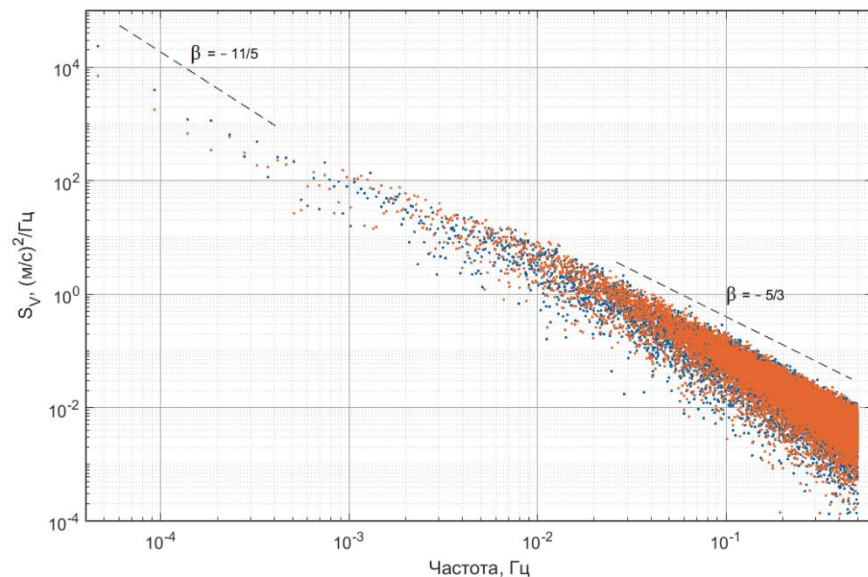
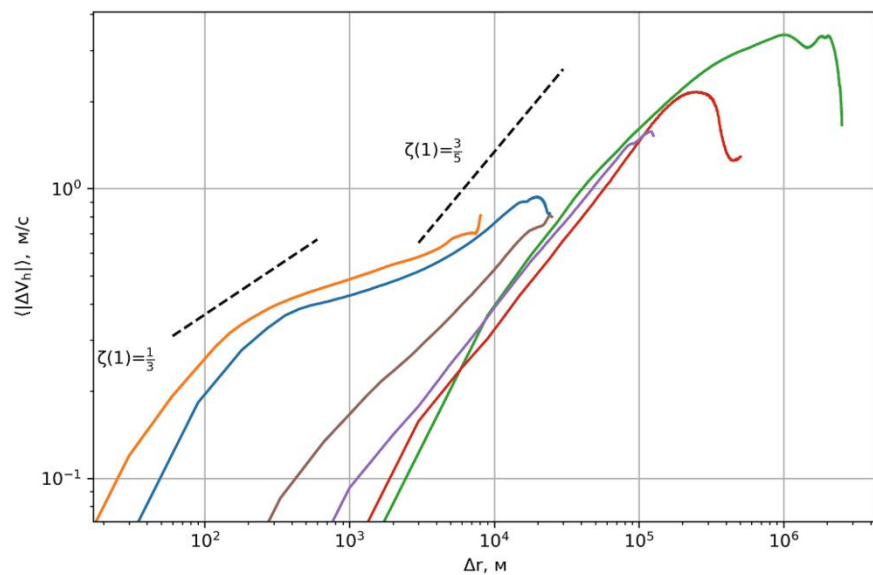
T, K

$V_h, m/c$





$$-\beta = 1 + \zeta(2) \approx 1 + 2\zeta(1)$$



**Структурные функции модельных абсолютных разностей (слева),
спектральная плотность измеренных флуктуаций температуры и модуля
горизонтальной скорости ветра (справа)**

Выводы

Численное моделирование метеорологических полей и турбулентной динамики дневного АПС выполнено с помощью последовательного вложения 2-х областей вихреразрешающей модели PALM в 3 области расчета мезомасштабной модели WRF с использованием нисходящего масштабирования сеток с увеличением горизонтального разрешения от $9 \times 9 \text{ км}^2$ до $30 \times 30 \text{ м}^2$.

Сравнение результатов моделирования с результатами наземных наблюдений, акустического и микроволнового зондирования атмосферы, а также высотных наблюдений с использованием размещенных на платформе привязного аэростата датчиков температуры и влажности показало, что согласованность результатов моделирования и наблюдений соответствует достигнутому ранее уровню. Однако при моделировании не удалось корректно воспроизвести форму вертикальных профилей температуры в средней части АПС и модуля горизонтальной скорости ветра, а также уменьшить отклонения между прогнозируемыми и наблюдаемыми значениями удельной влажности. Отклонения средних за 1 час динамической скорости и полной ТКЭ, рассчитанных в LES, от результатов наблюдений составляют десятки процентов.

Мгновенные поля температуры и модуля горизонтальной скорости ветра, рассчитанные в моделях WRF и PALM, обладают пространственным самоподобием в интервале масштабов, который находится внутри каждого из вложенных доменов. Скейлиновые экспоненты структурных функций первого порядка абсолютных разностей модуля горизонтальной скорости в доменах WRF на масштабах 3-100 км близки к $3/5$, что соответствует скейлингу Больджиано-Обухова. Поведение структурных функций первого порядка поля температуры WRF отличается от скейлинга Больджиано-Обухова, рассчитанные структурные функции имеют приблизительно тот же показатель, что и структурные функции модуля горизонтальной скорости. Структурные функции первого порядка абсолютных разностей температуры и модуля горизонтальной скорости LES в области крупных масштабов 3-10 км могут быть аппроксимированы степенной зависимостью с показателем из диапазона $(1/5, 3/5)$, в области меньших масштабов существует участок с колмогоровской экспонентой $1/3$.



Спасибо за внимание!