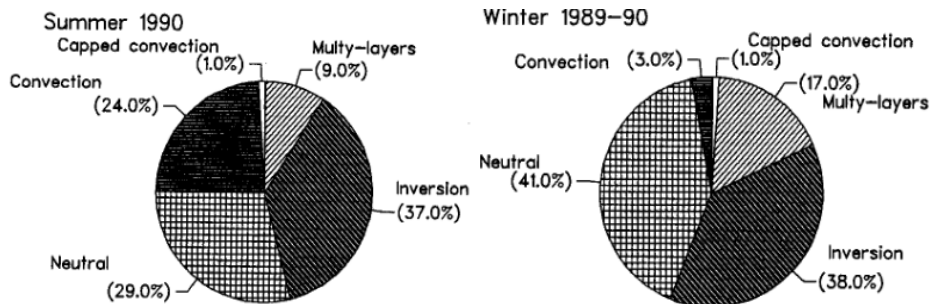


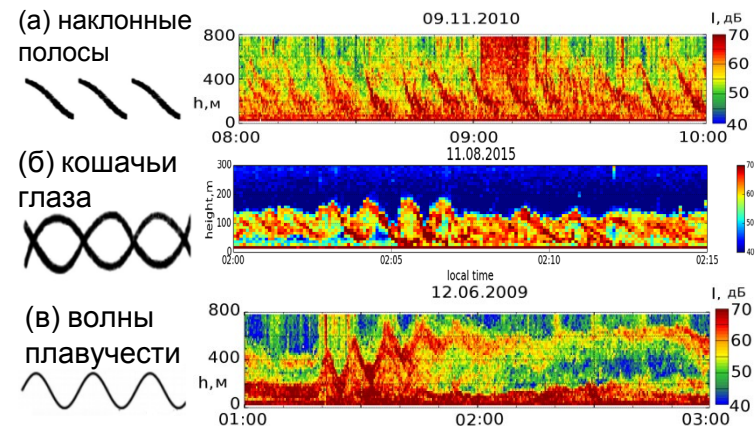
Анализ динамической структуры устойчивого АПС по содарным данным с использованием композиционного анализа

Люлюкин В.С., Зайцева Д.В., Каллистратова М.А., Кузнецов Д.Д.
ИФА им. А.М. Обухова РАН

Содарные исследования структуры АПС



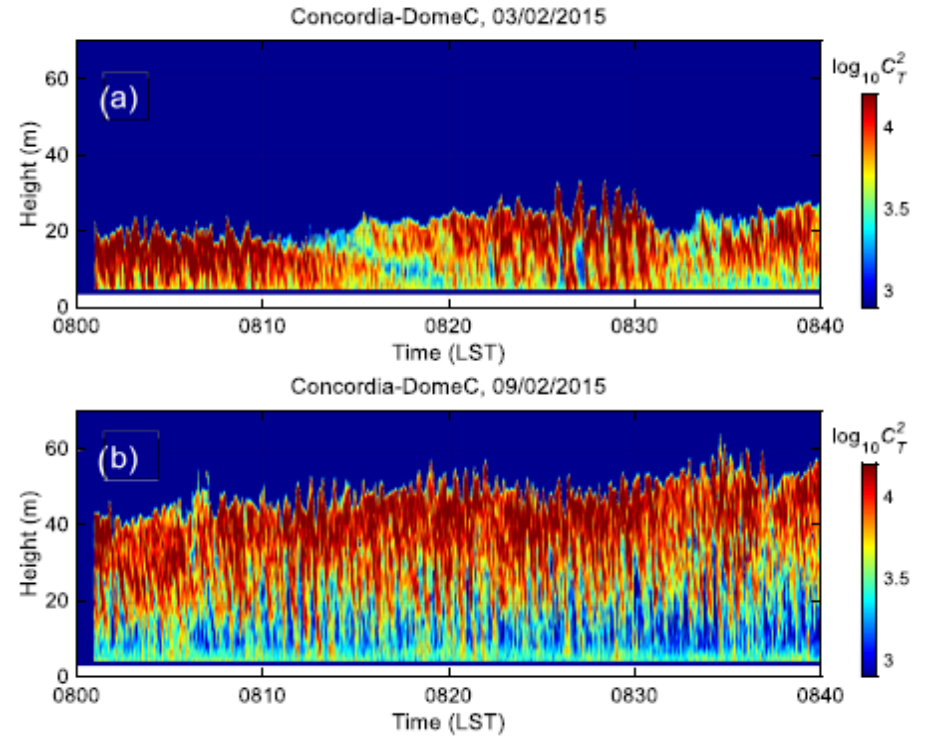
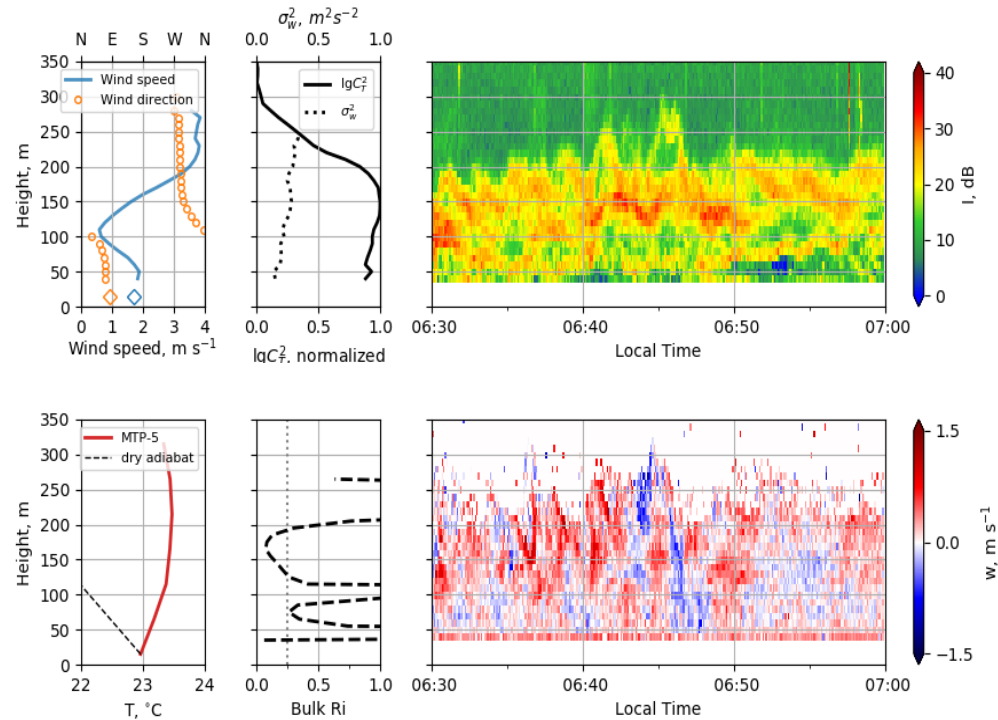
Pekour M.S., Kallistratova M.A. Sodar study of the boundary layer over Moscow for air pollution application // Appl. Phys. B 1993. V. 57. P. 49–55.



Люлюкин В.С., Каллистратова М.А., Кузнецов Р.Д. и др. Внутренние гравитационно-сдвиговые волны в атмосферном пограничном слое по данным акустической локации // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 2. С. 218–229.

Зайцева Д. В., Каллистратова М.А., Люлюкин В.С. и др. Субмезомасштабные волнообразные структуры в атмосферном пограничном слое и их параметры по данным содарных измерений в Подмоскowie // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2023. – Т. 59. – №. 3. – С. 275-285.

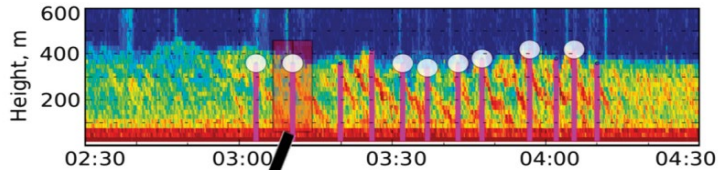
Детектирование волновых структур



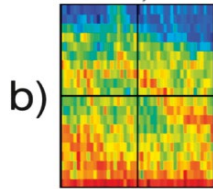
Lyulyukin V, Kallistratova M., Zaitseva D., Kuznetsov D., Artamonov A., Repina I., Petenko I., Kouznetsov R., Pashkin A. 2019: Sodar Observation of the ABL Structure and Waves over the Black Sea Offshore Site // Atmosphere 2019, V. 10. № 12. Paper 811.

Petenko I., G. Casasanta, M. Kallistratova, V. Lyulyukin, C. Genthon, R. Sozzi, S. Argentini 2023: Kelvin-Helmholtz Billows in the Rising Turbulent Layer during Morning Evolution of the ABL at Dome C, Antarctica // Boundary-Layer Meteorology (2023) V. 187. P. 163-192.

Композитный анализ содарных данных

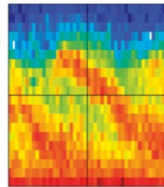


a)

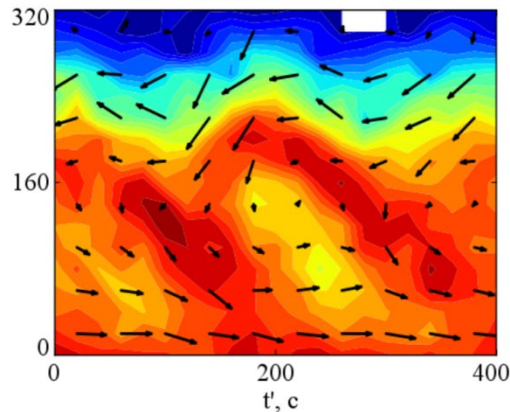
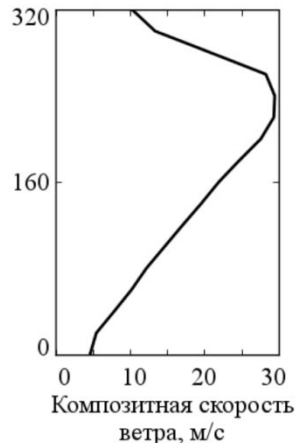


b)

AVERAGING



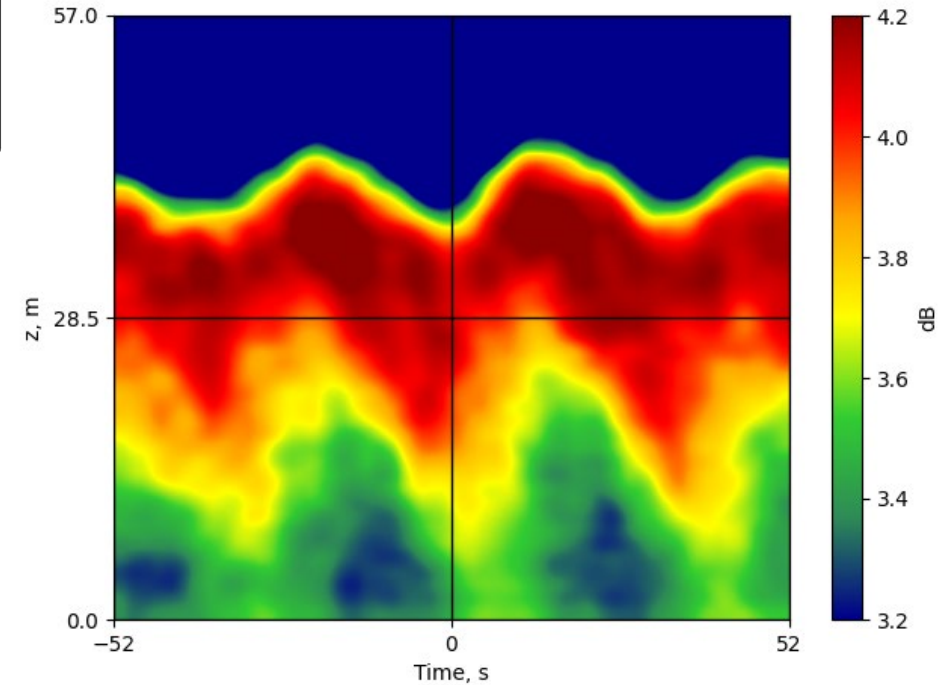
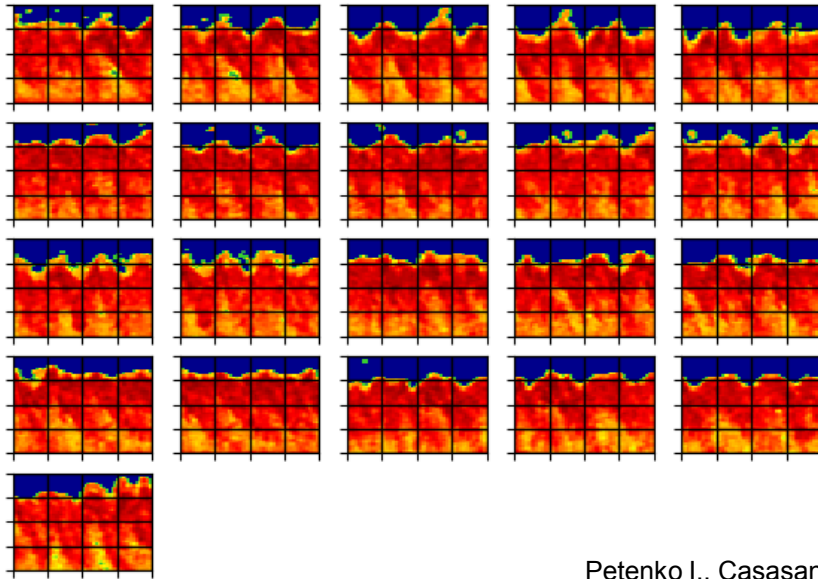
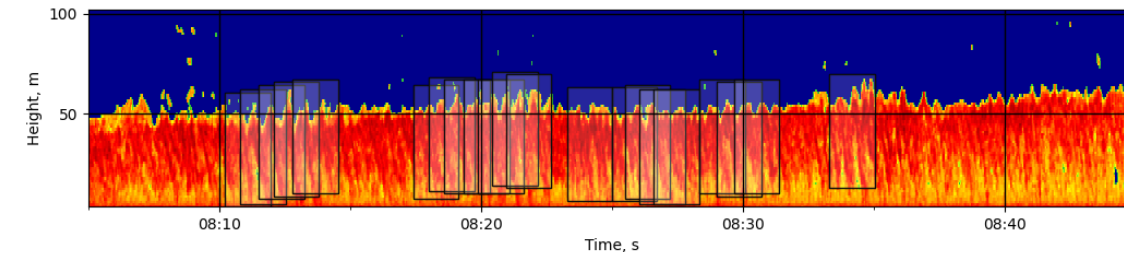
c)



- Выделение субмезомасштабных возмущений из фоновой изменчивости профилей затруднено: для содарных данных типичное время осреднения, необходимое для достаточной статистической обеспеченности средних профилей, составляет порядка 10-30 минут
- Позволяет выделить характерные паттерны в поле интенсивности эхосигнала
- Восстановление тонкой динамической структуры. Выявление завихренности поля ветра

Lyulyukin V., Kouznetsov R., Kallistratova M. The composite shape and structure of braid patterns in Kelvin-Helmholtz billows observed with a sodar. J. Atmos. Oceanic Technol. — 2013. — V.30 — P. 2704—2711.

Композитный анализ содарных данных

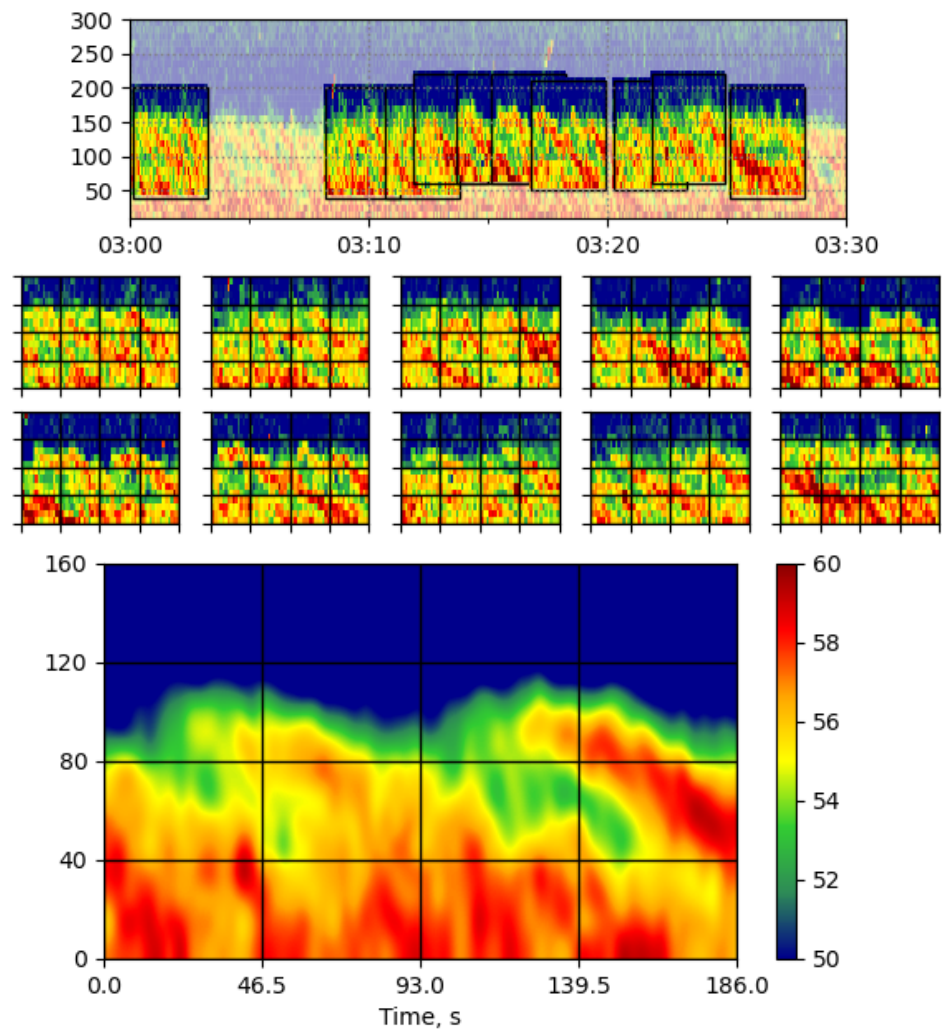
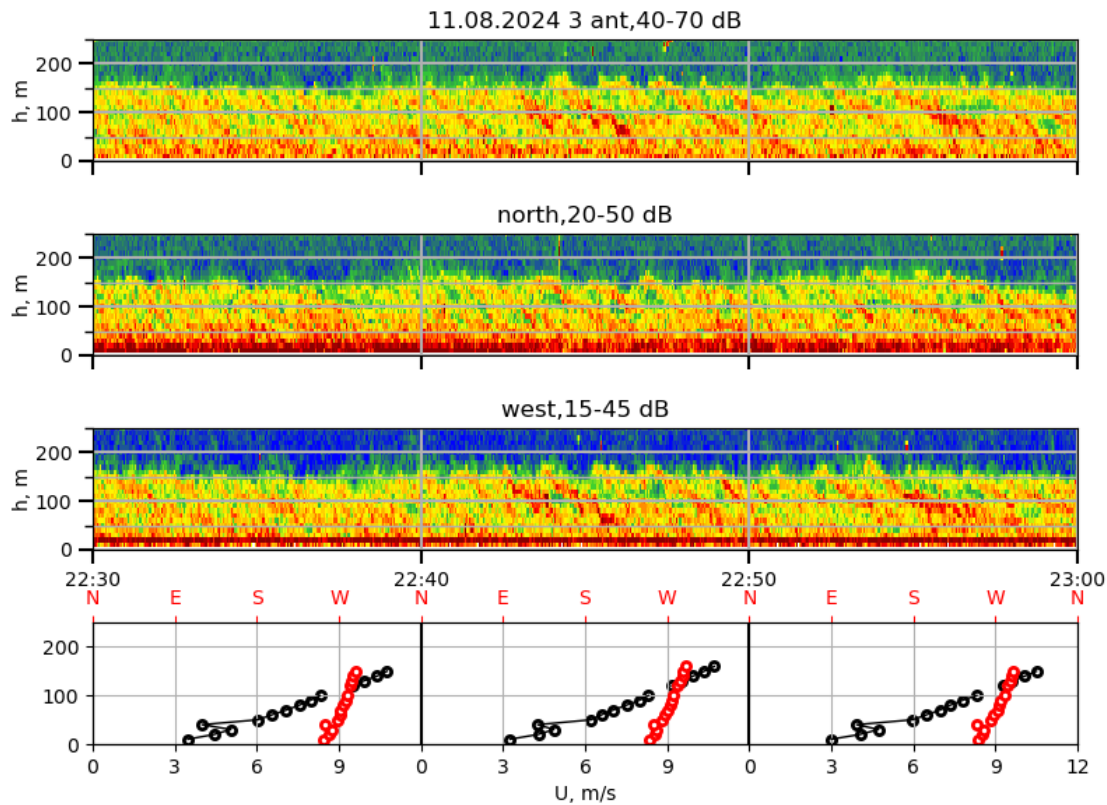


Petenko I., Casasanta G., Bucci S., Kallistratova M., Sozzi R., Argentini S. 2020: Turbulence, Low-Level Jets, and Waves in the Tyrrhenian Coastal Zone as Shown by Sodar. // Atmosphere (MDPI) 2020, V. 11, No 1, paper 28.

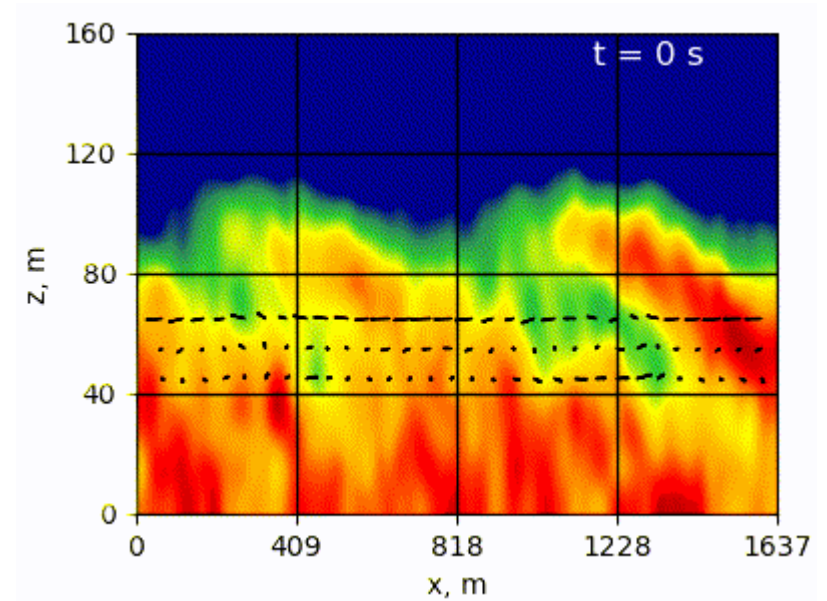
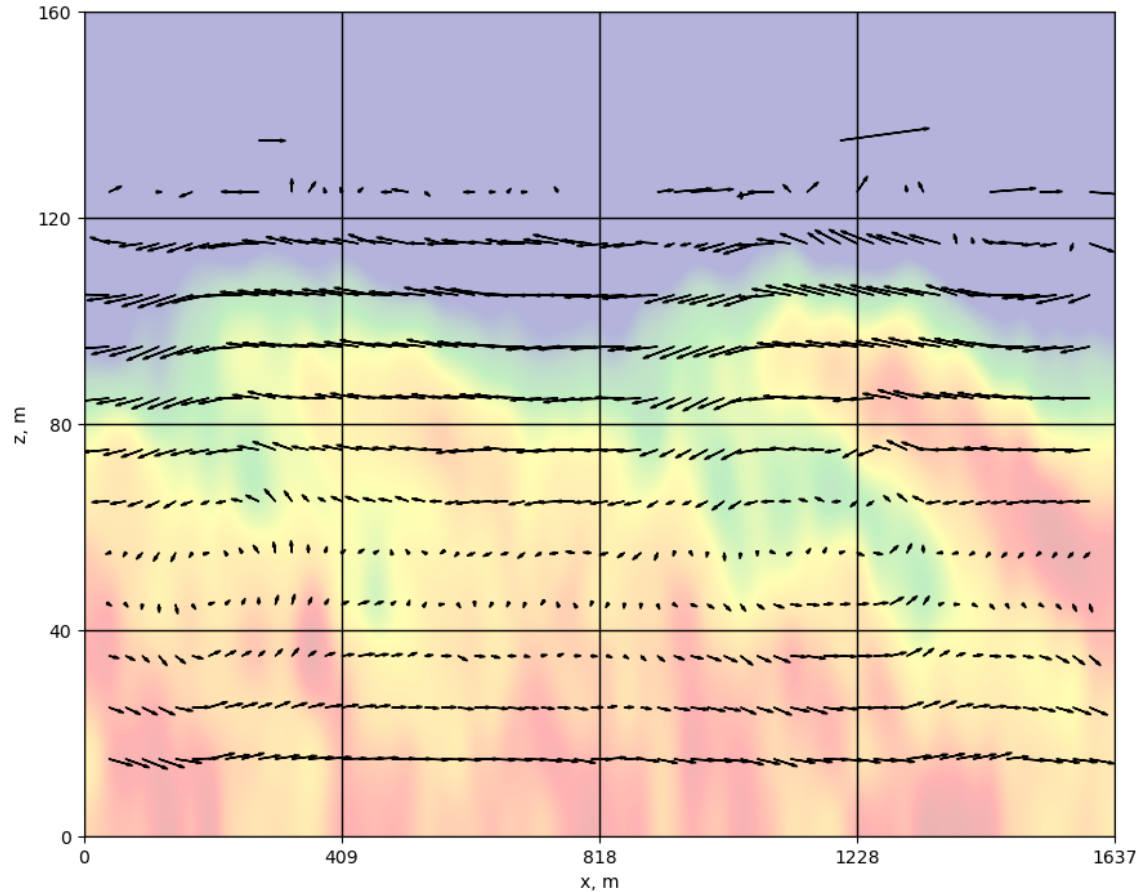
Мотивация для новых исследований

- Новые данные измерений, в том числе данные высокого разрешения (3 с по времени, 5 м по высоте) и данные из экспедиционных кампаний
- Высокое разрешение позволяет перейти к нормализованным по масштабам композитным структурам
- Необходимость анализа большого числа эпизодов для кластеризации типов вихревых структур
- Восстановление двумерного поля ветра в виде, пригодном для прямого сопоставления с результатами LES моделирования и форсинга моделей переноса примесей
- Получение количественных оценок для структуры поля ветра
- Параметризация обменных процессов в устойчивом АПС

KHB type 1: «billows»

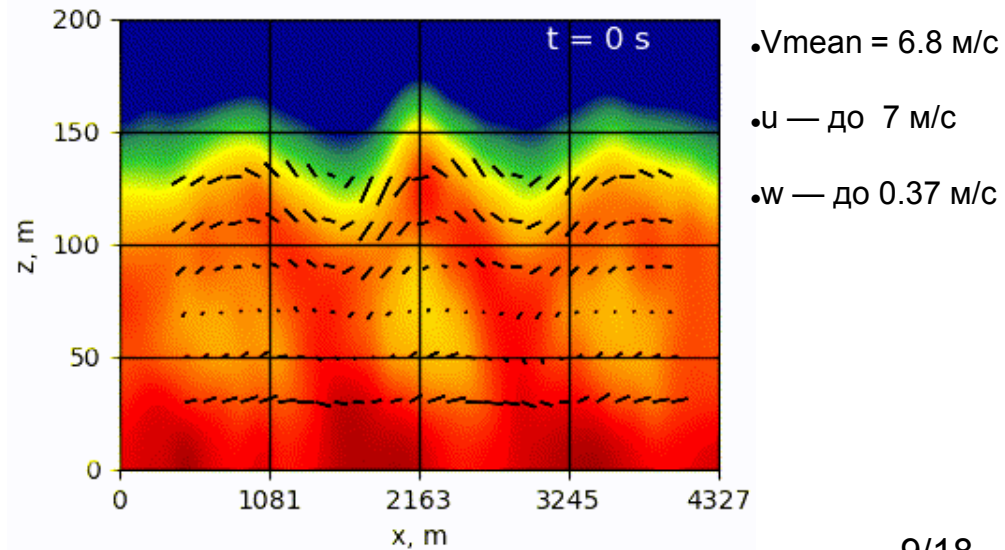
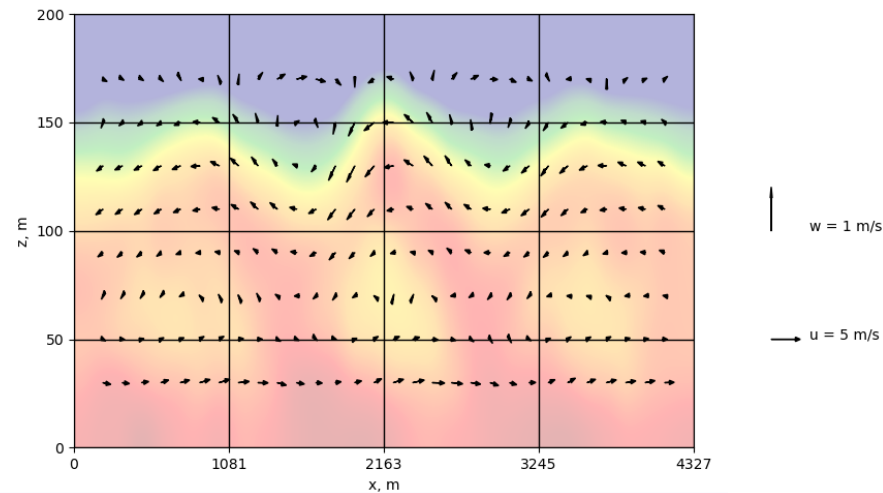
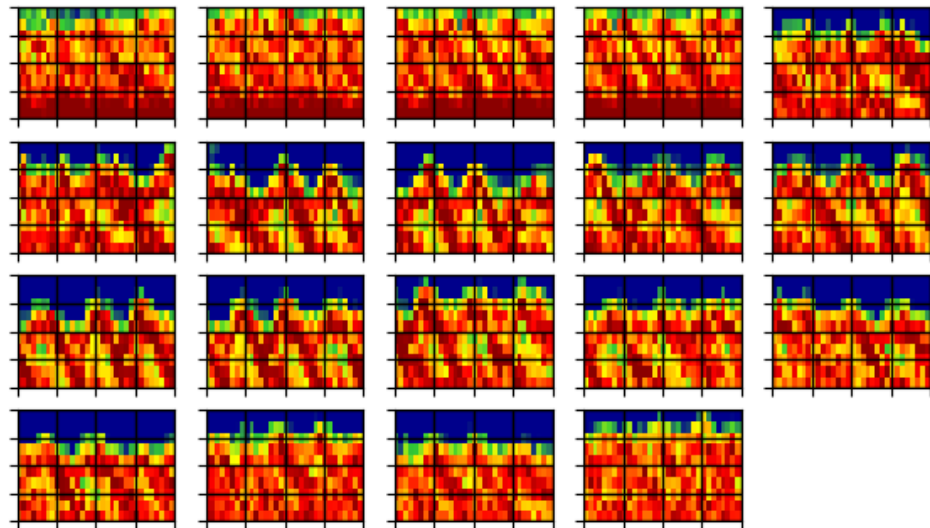
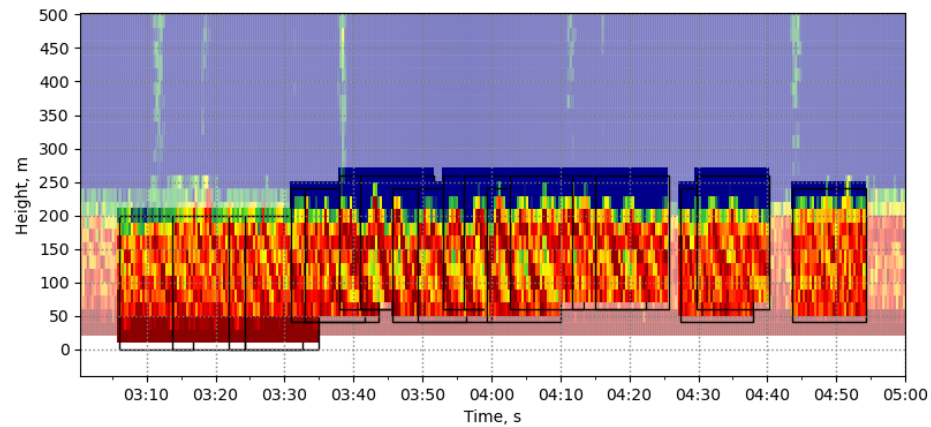


КНВ type 1: «billows». Композитное поле скоростей

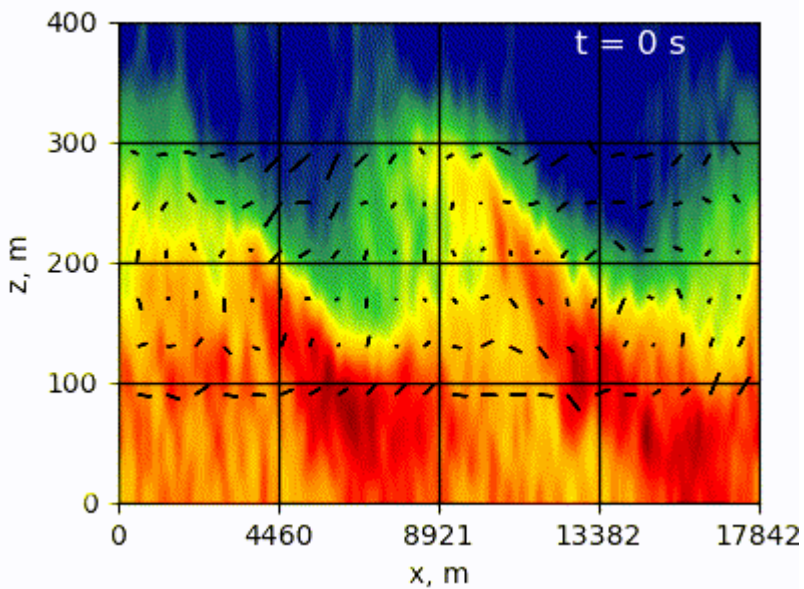
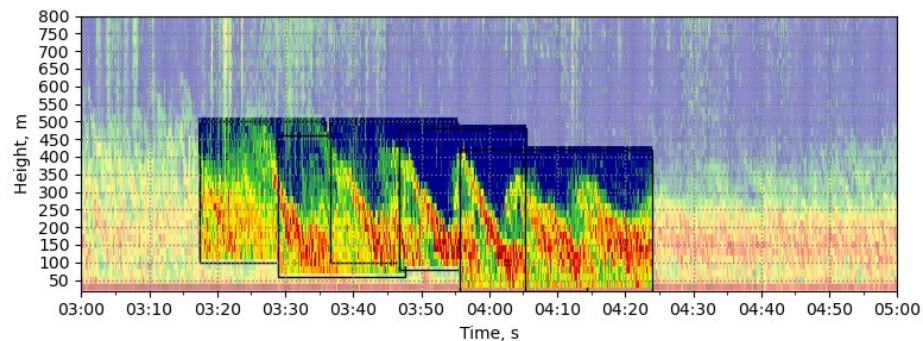


- Средняя скорость потока V_{mean} — 8.8 м/с
- Горизонтальная композитная скорость относительно средней скорости потока u — до 8 м/с
- Вертикальная композитная скорость w — до 0.25 м/с

KHB type 1: «billows»



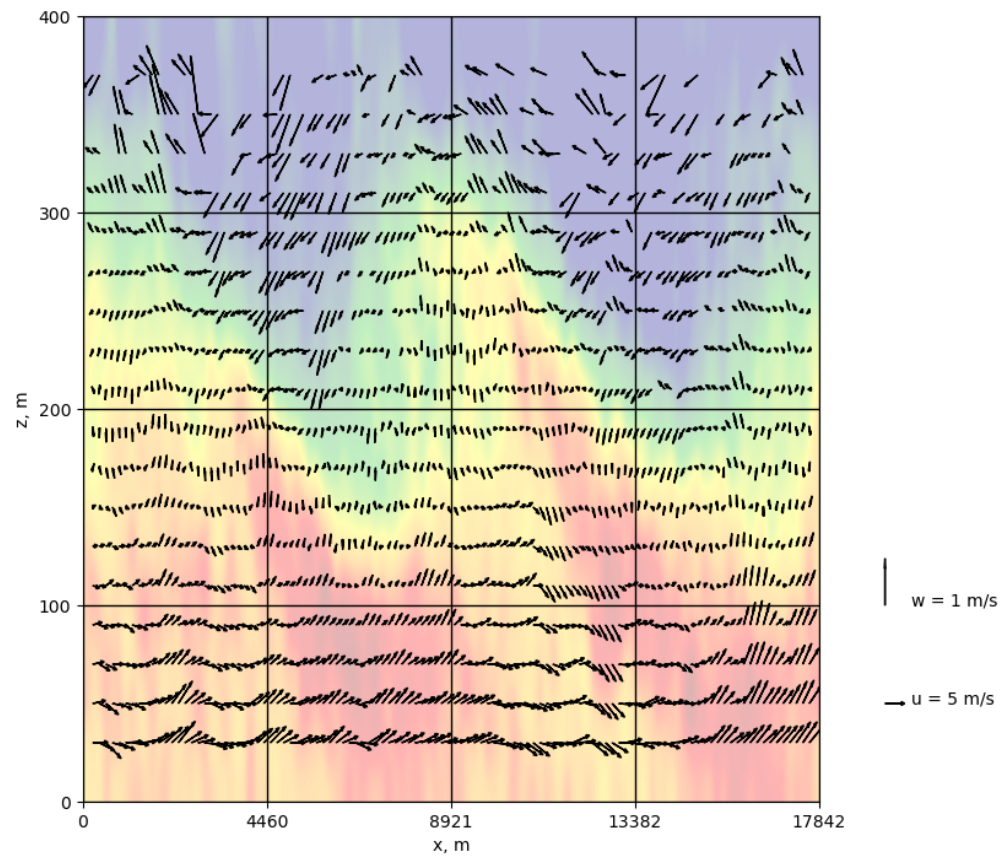
KHB type 1.5: «stripes»



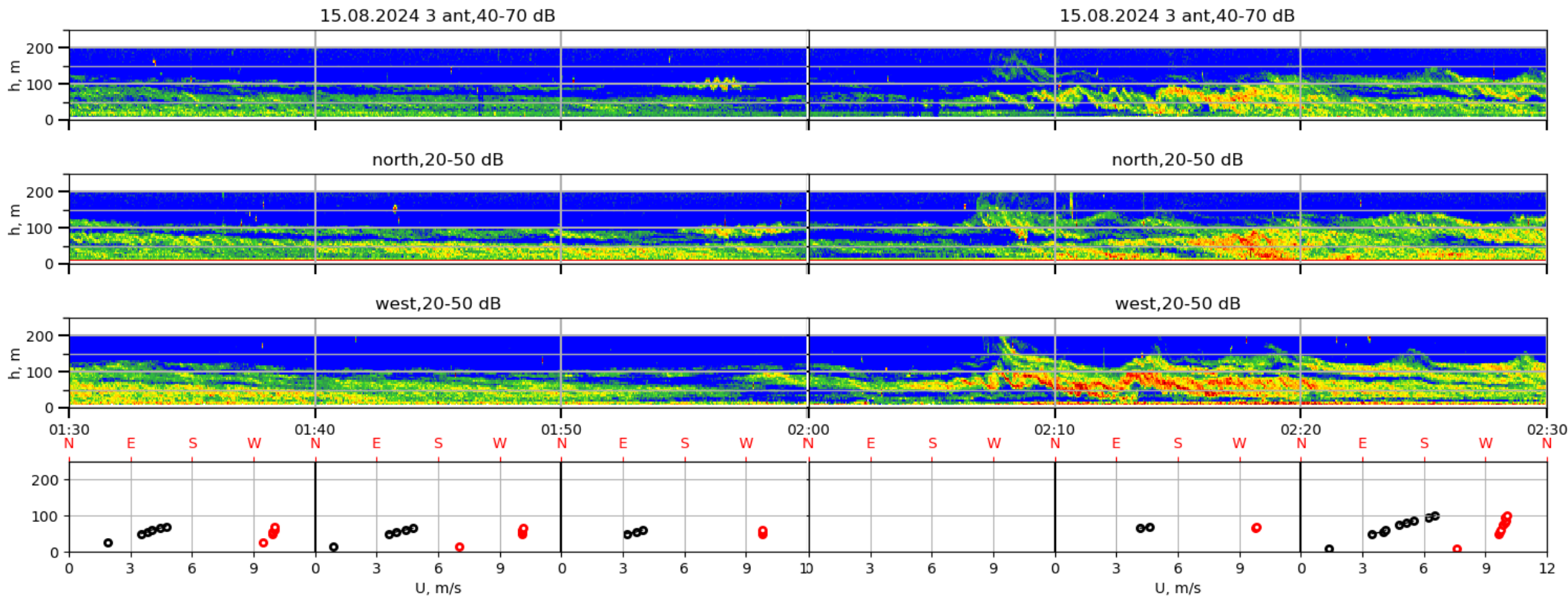
• $V_{\text{mean}} = 15.9 \text{ m/c}$

• u — до 16.5 m/c

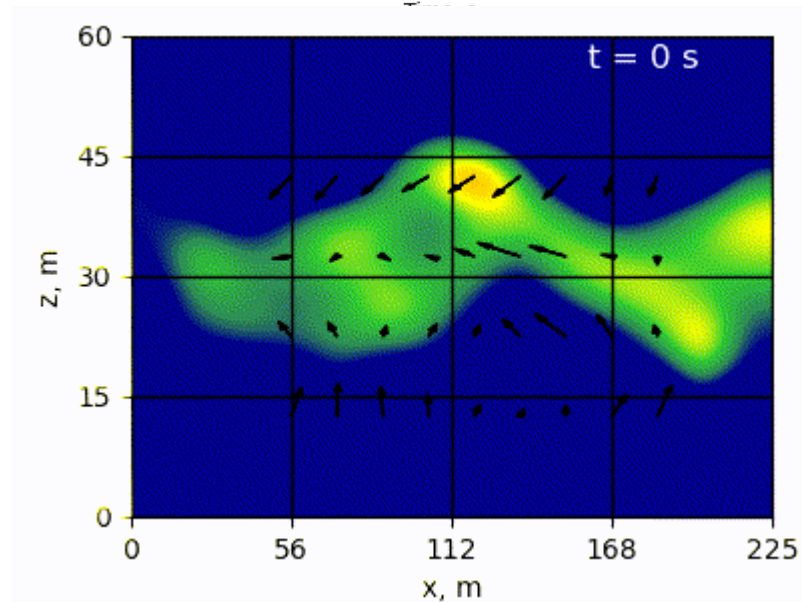
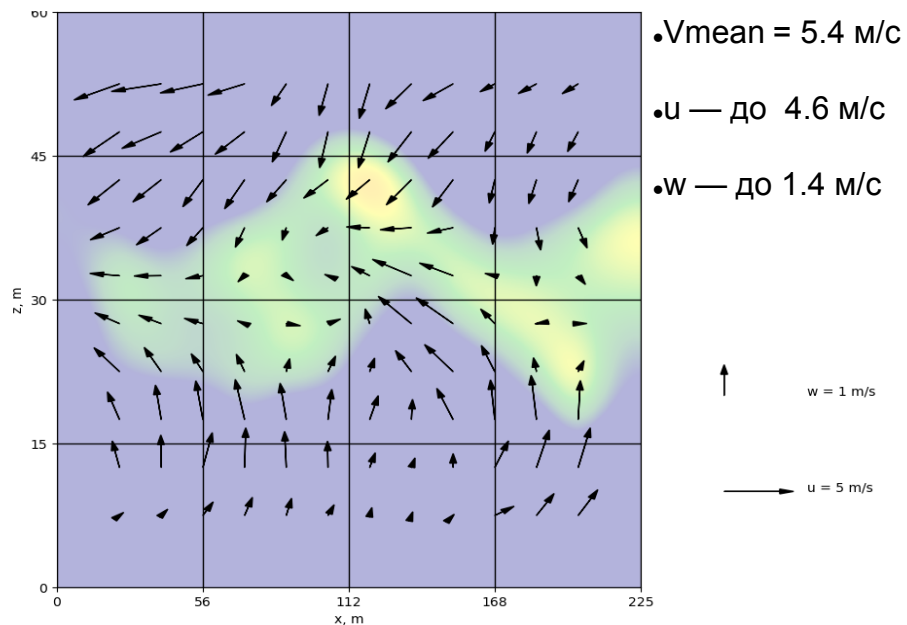
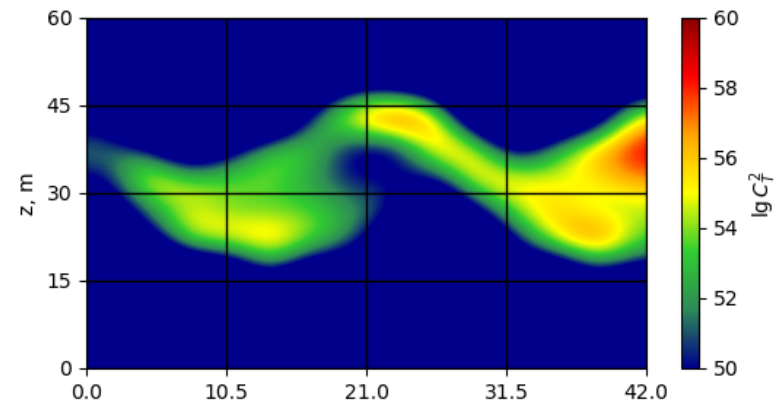
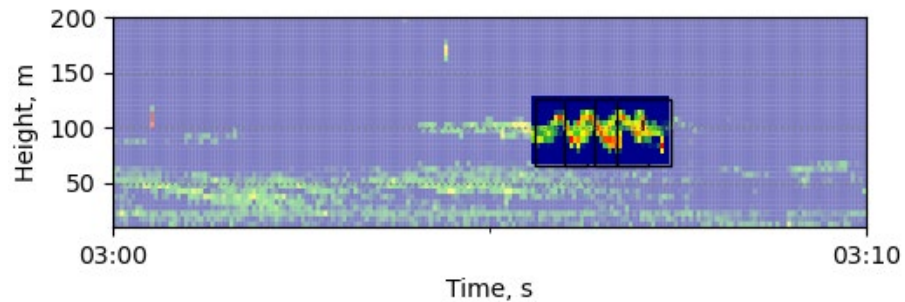
• w — до 1.5 m/c



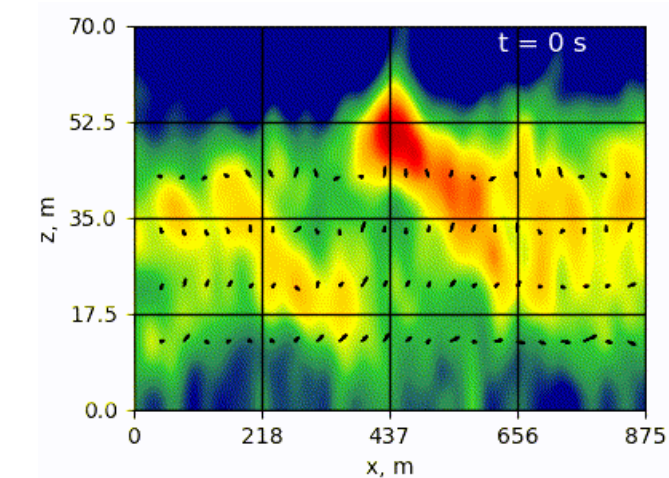
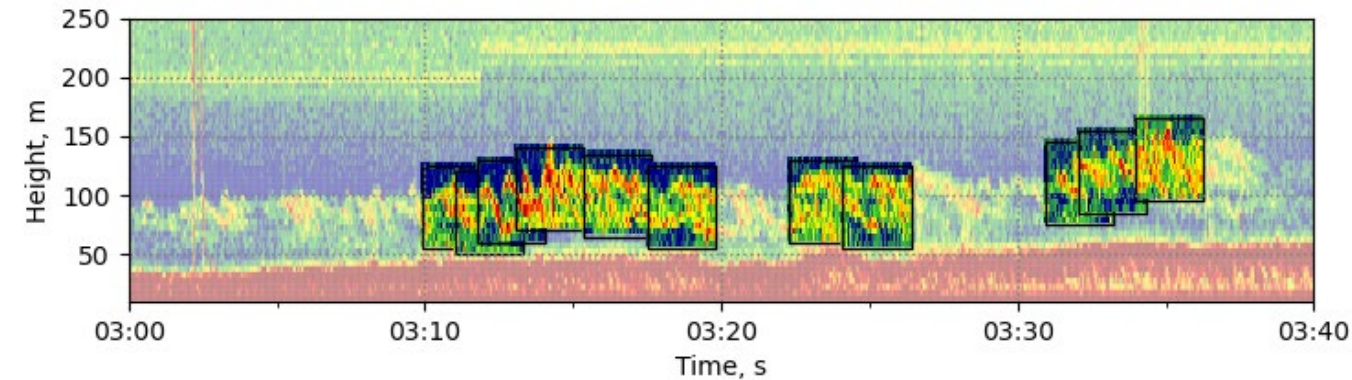
KHB type 2: «cat eyes»



KHB type 2: «cat eyes»



KHB type 2: «cat eyes»



- $V_{\text{mean}} = 6.3 \text{ m/s}$
- u — до 6.1 m/s
- w — до 0.9 m/s

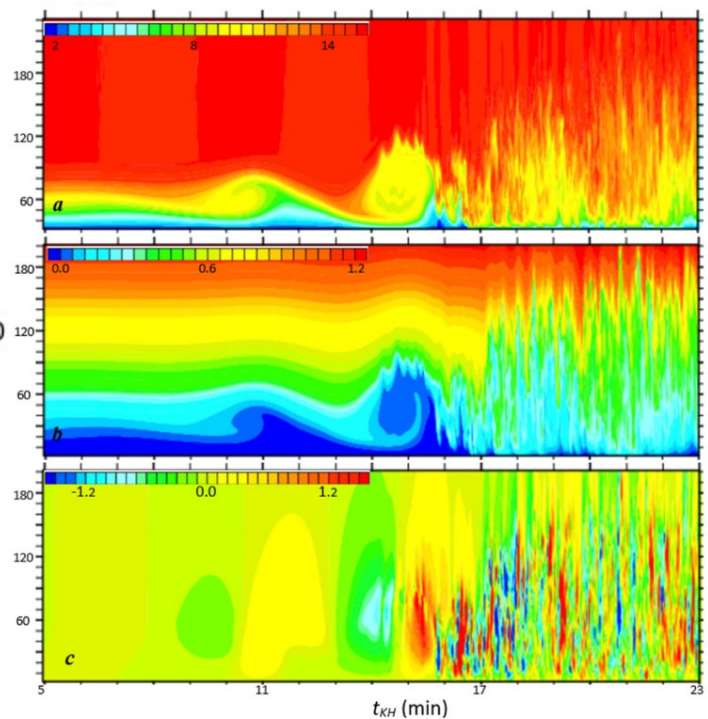
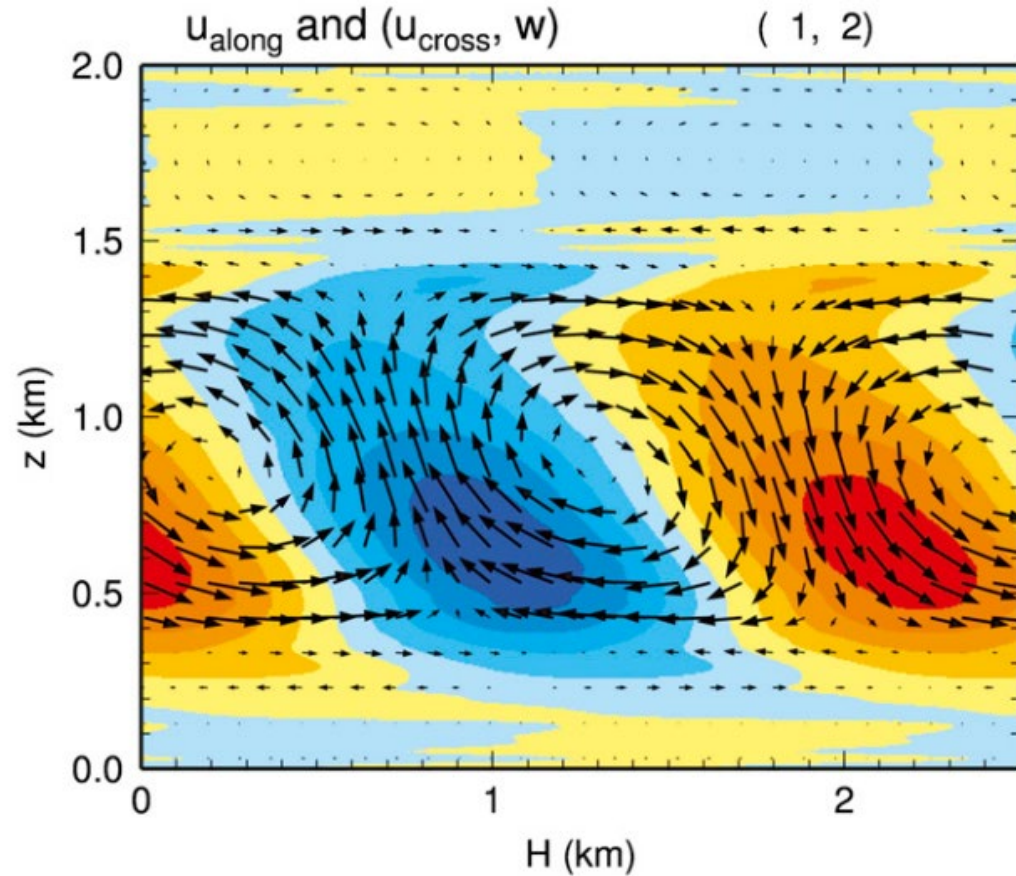


Figure 4. Time-height (t_{KH} - z) sections of (a) u -wind (u , m/s), (b) potential temperature ($\theta - \theta_0$, K), and (c) vertical velocity (w , m/s) sampled near the center of the domain. Only the lowest 200 m portion and for t_{KH} between 5–23 min is shown.

Jiang, Q. Growth and Breakdown of Kelvin–Helmholtz Billows in the Stable Atmospheric Boundary Layer. *Atmosphere* 2024, 15, 220.
<https://doi.org/10.3390/atmos15020220>

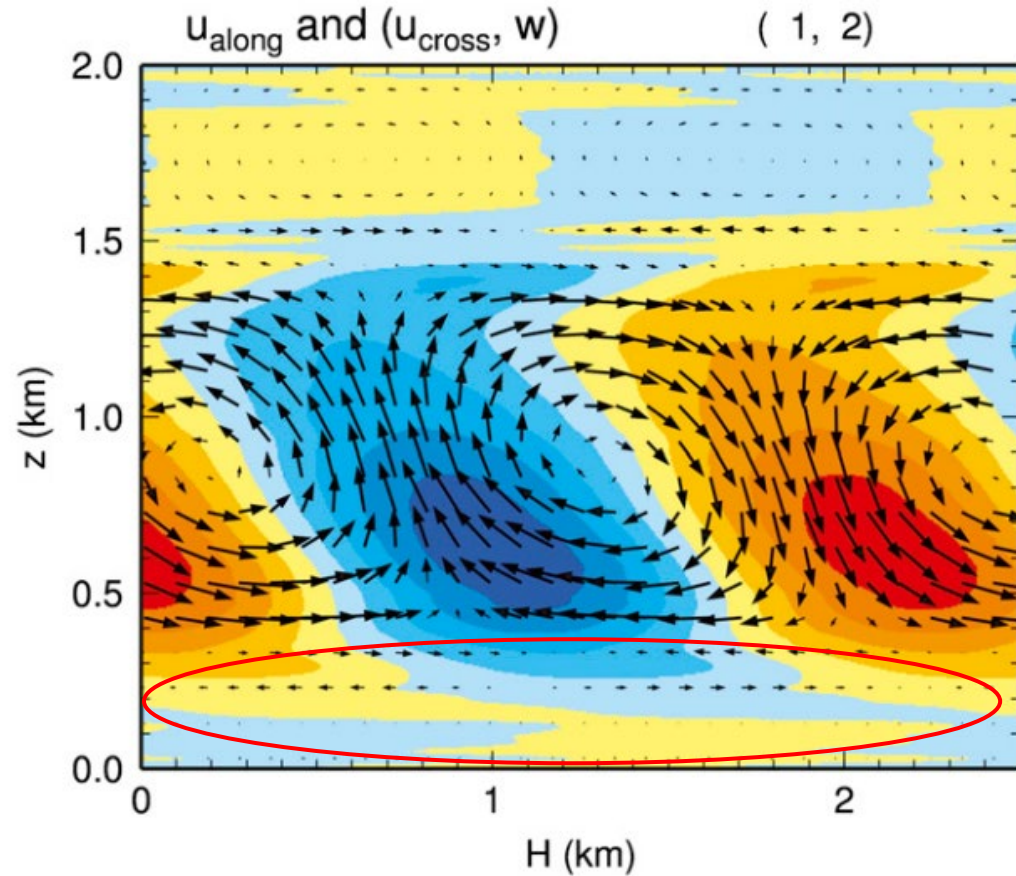
С чем сопоставлять?



Nakanishi M., Shibuya R., Ito J., Niino H. Large-Eddy Simulation of a Residual Layer: Low-Level Jet, Convective Rolls, and Kelvin–Helmholtz Instability // Journal of the Atmospheric Sciences. — 2014. — Vol. 71, no. 12. — P. 4473–4491. — DOI: 10.1175/JAS-D-13-0402.1.

- LES симуляция остаточного слоя (residual layer) и EOF анализ для выделения вихревых структур
- На рисунке — симуляция конвективных роллов ВЫШЕ ядра низкоуровневого струйного течения

С чем сопоставлять?



Nakanishi M., Shibuya R., Ito J., Niino H. Large-Eddy Simulation of a Residual Layer: Low-Level Jet, Convective Rolls, and Kelvin–Helmholtz Instability // Journal of the Atmospheric Sciences. — 2014. — Vol. 71, no. 12. — P. 4473–4491. — DOI: 10.1175/JAS-D-13-0402.1.

- LES симуляция остаточного слоя (residual layer) и EOF анализ для выделения вихревых структур

- На рисунке — симуляция конвективных роллов ВЫШЕ ядра низкоуровневого струйного течения

Конечно, не с этим!

С чем сопоставлять?

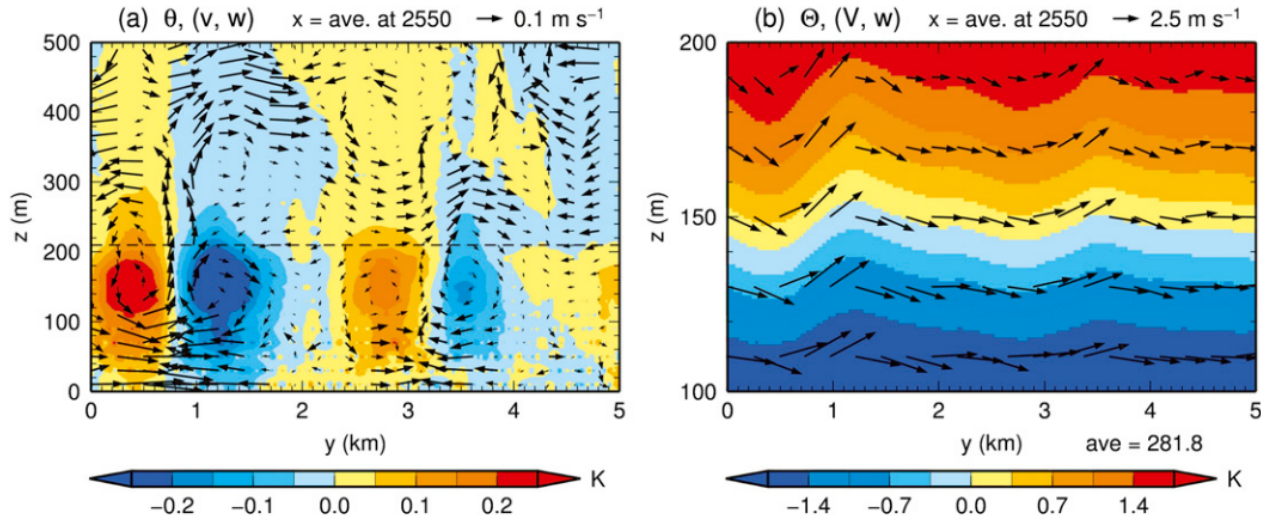
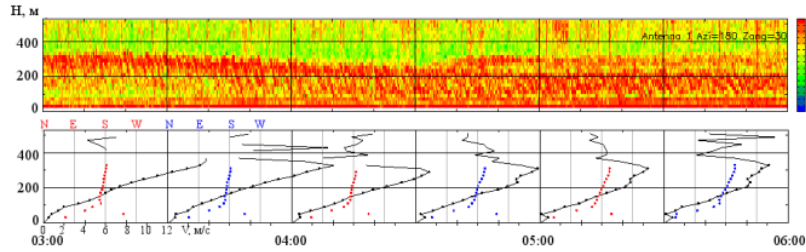


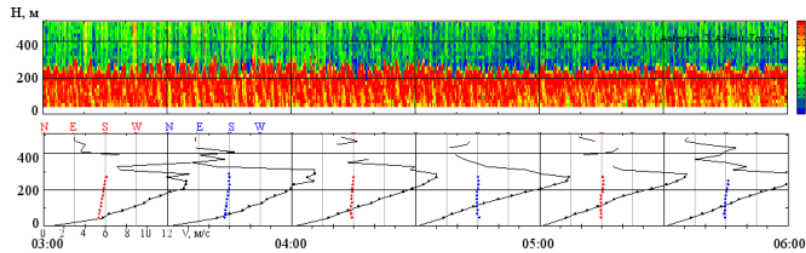
FIG. 14. Vertical distributions in the y - z plane of simulated (a) fluctuations from an average over each horizontal plane and (b) resolved-scale quantities for potential temperature (colors) and velocities in the y and z directions (arrows) at 2550 LST on day 33. All the quantities are averaged over the x direction. The horizontal dashed line in (a) represents the location of the LLJ nose at 2550 LST. In (b), the potential temperature is a difference from its average value between $z = 100$ and 200 m (281.8 K), the v component is a difference from the phase velocity of waves (-5.6 m s^{-1}), and the w component is multiplied by 33 against the v component. Note that the layer shown in (b) is between $z = 100$ and 200 m .

- EOF анализ показывал образование «КН vortices» в областях с «КН like instability» под конвективными роллами и их динамическую связь

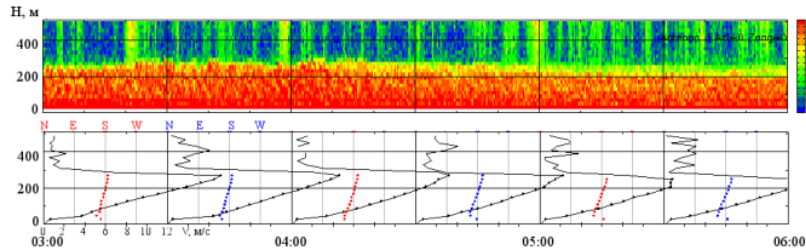
Наблюдения ВКГ на мезомасштабной сети зондирования в Московской области



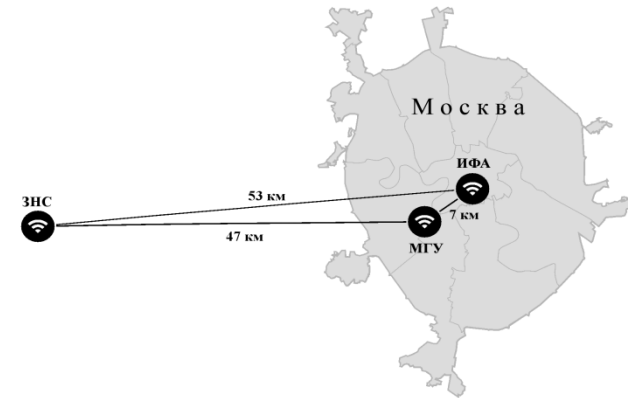
(а) ИФА



(б) МГУ



(в) ЗНС



Заключение

- Разработанный метод композитного осреднения содарных данных позволяет выделить регулярную вихревую составляющую поля турбулентности и ветра из сильно зашумленных экспериментальных данных
- Метод позволяет восстановить двумерную структуру поля скорости внутри волны Кельвина-Гельмгольца с высоким разрешением и оценить циркуляцию воздушных масс в волновом слое.
- Полученное композитное поле скорости может быть непосредственно сопоставлено с результатами LES моделирования и использоваться в качестве форсинга модели переноса.
- Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 15-17-00060

Спасибо за внимание!