

Конвективные структуры в приповерхностном слое воздуха

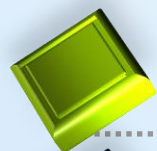
Е.А.Малиновская, О.Г.Чхетиани, Г.В.Азизян, А.А.Хапаев
Институт физики атмосферы им.А.М. Обухова РАН, Москва,
elen_am@inbox.ru

БЛАГОДАРНОСТИ И ССЫЛКИ НА ГРАНТЫ.

Авторы хотят выразить признательность Л.О.Максименкову, Е.А.Шишову за помощь в организации и проведении натурных измерений. Отдельная благодарность Г.С. Голицыну, Е.Б.Гледзеру за интерес к работе и консультации.

Исследования выполнены при поддержке
Российского научного фонда (проект 20-17-00214).

Структура доклада



Введение



Источники данных



Об условиях
проведения измерений

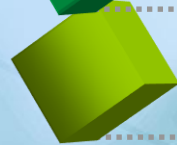


Рэмпы

Функции спектральной
плотности



Структурные функции



Заключение

Источники данных

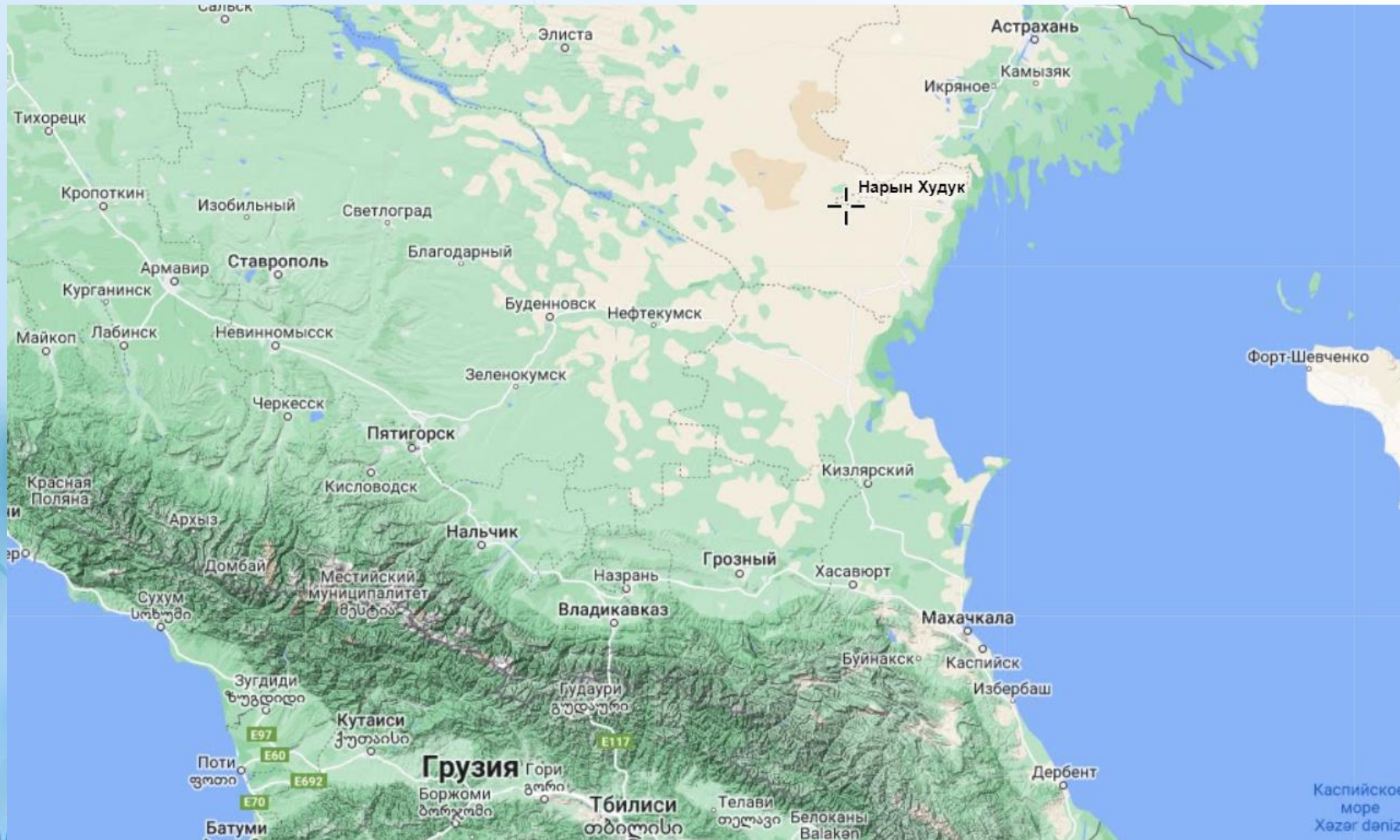
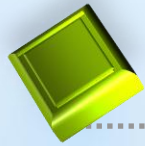


Рис.2. Географическое место расположение территории, где проходят измерения



Введение

- Под влиянием конвекции усиливаются вертикальные пульсационные составляющих скорости с высотой [1],
- отмечается рост корреляций пульсации температуры и скорости воздушного потока [2],
- обеспечивается эмиссия субмикронного аэрозоля в условиях слабых ветров [3],
- что обуславливает установление универсальных профилей [4].

1. Frisch A. S., Businger J. A. Boundary-Layer Meteorology. 1973, Vol. 3, 3, pp. 301-328.
2. Kopriv B. M. et al. Boundary-layer meteorology. 1998, Vol. 88, 3, pp. 399-423.
3. Chkhetiani, O. G. et al. Atm. Chemistry and Physics, 2012, Vol. 12(11), P. 5147–5162.
4. Малиновская Е. А. и др. Доклады РАН. Науки о Земле, 2023, 509 (2), pp. 109–117.



Рис.1. Общий вид территории, где проходят измерения

1

Источники данных, 2010 и 2011 г.

- проволочные датчики (толщина 20мкм) с **синхронной записью** через регистратор S-Recorder ADC-LAB (рис.4).
- При комплексных полевых измерениях в Калмыкии в **2010** и **2011** г. были проведены полевые измерения на разной **высоте** (3, 6, 12, 25, 50, 100 см).
- **Частота фиксации данных 100 Гц.**

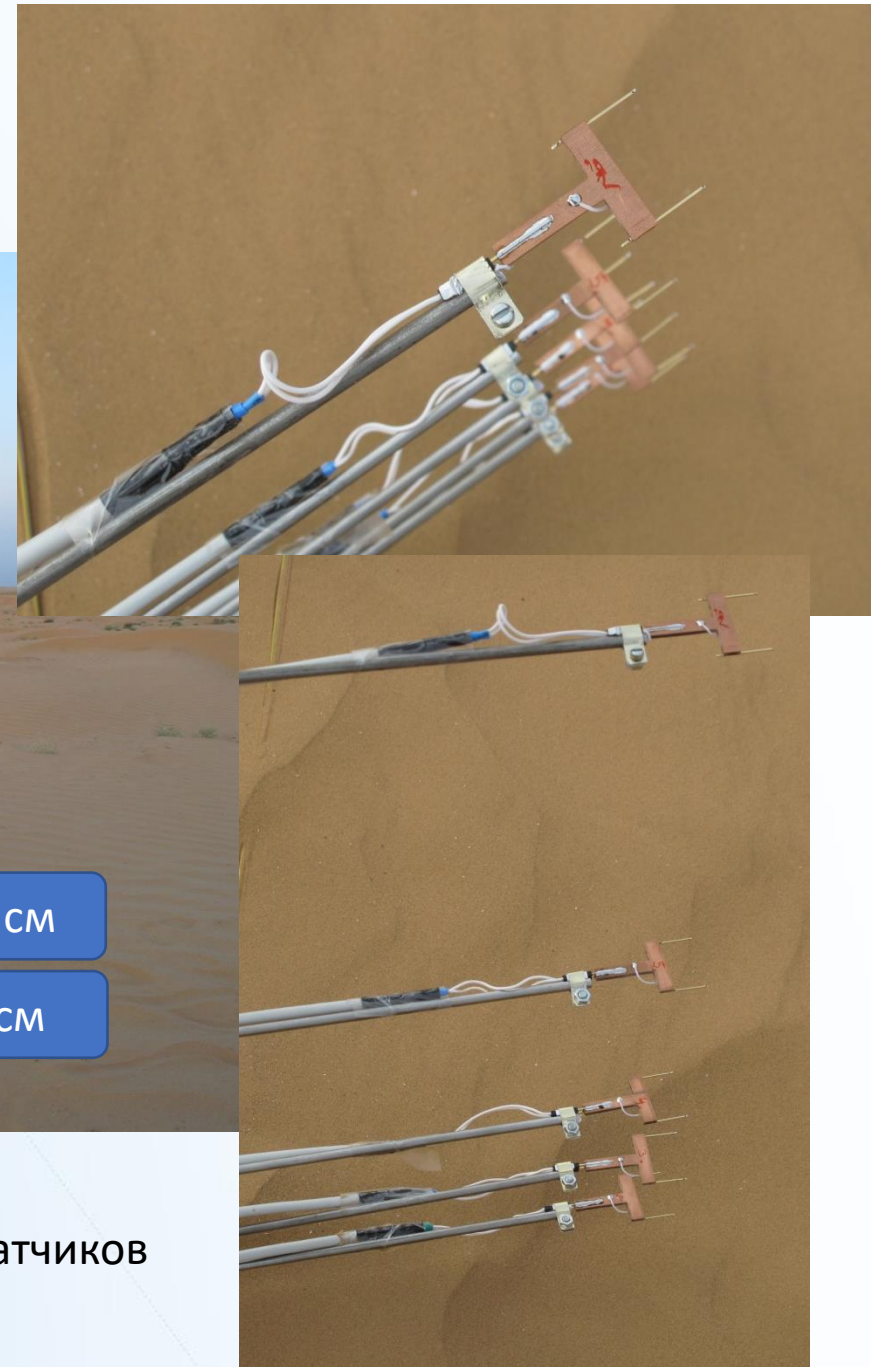
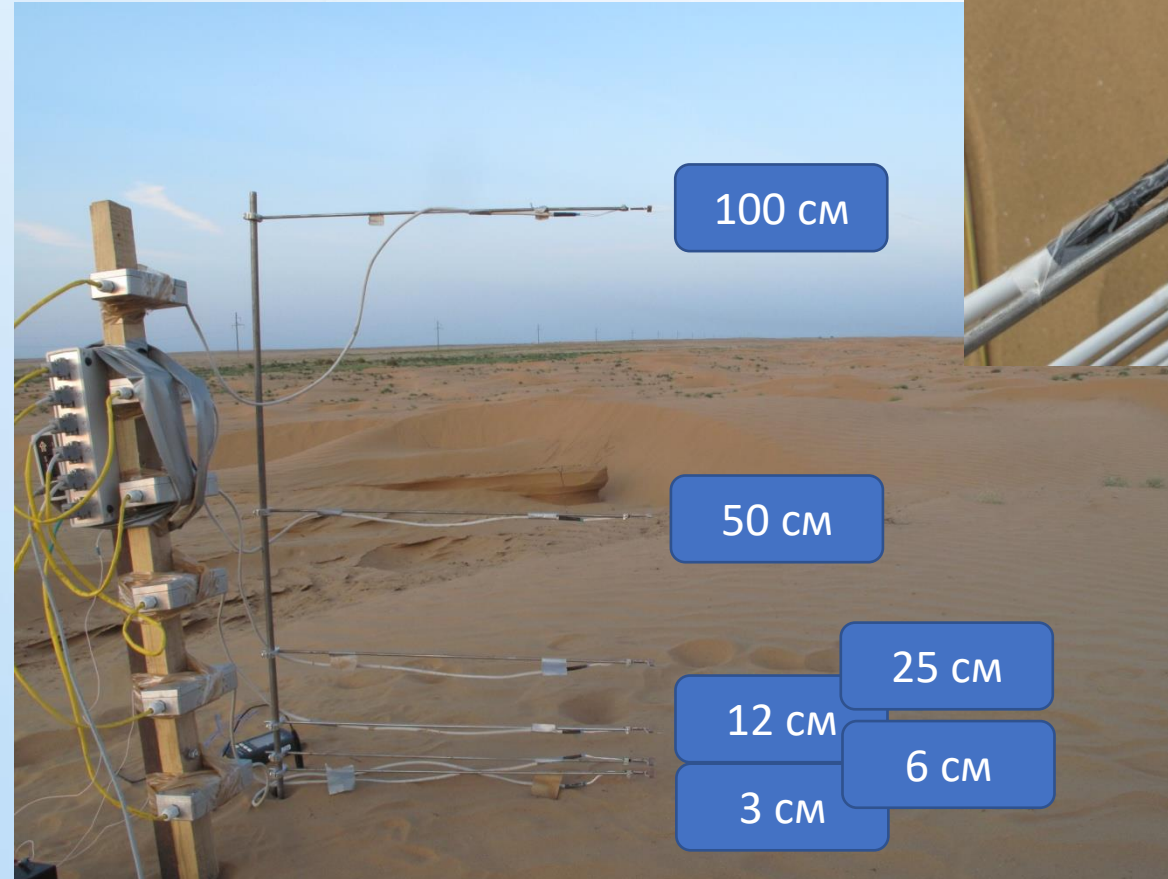


Рис.1. Измерение с использованием датчиков

Измерения пульсаций скорости и температуры, 2022-2024 г.

- Для определения пульсаций температуры и скорости разработан измерительный комплекс, включающий в себя термометры переменного тока и термоанемометры постоянной температуры, работающие на основе проволочных датчиков, изготовленные из **позолоченной вольфрамовой проволоки** толщиной **10 мкм** (рис.1).
- При комплексных полевых измерениях в Калмыкии в 2022 г. были проведены полевые измерения на разной высоте.
- **Частота фиксации** данных датчиков соответствует **1000 Гц**.

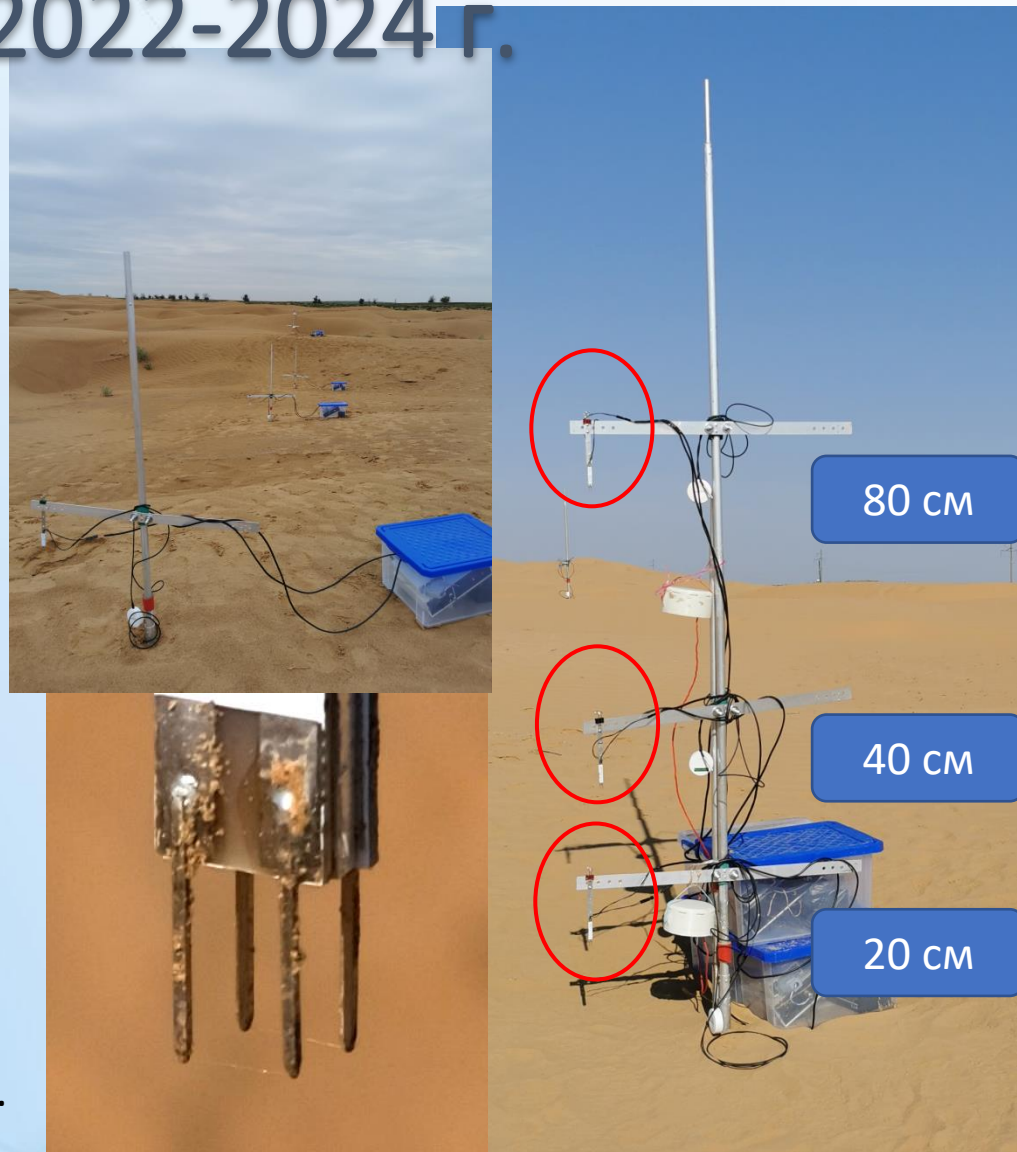
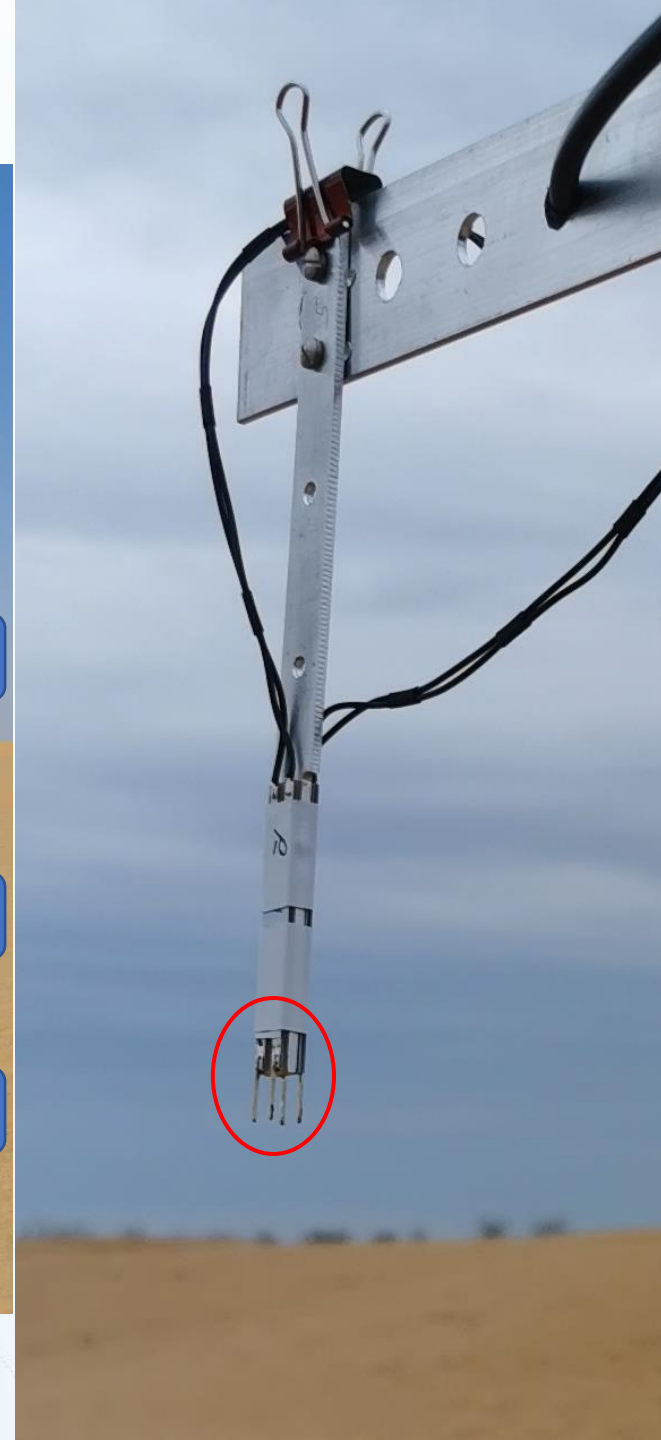


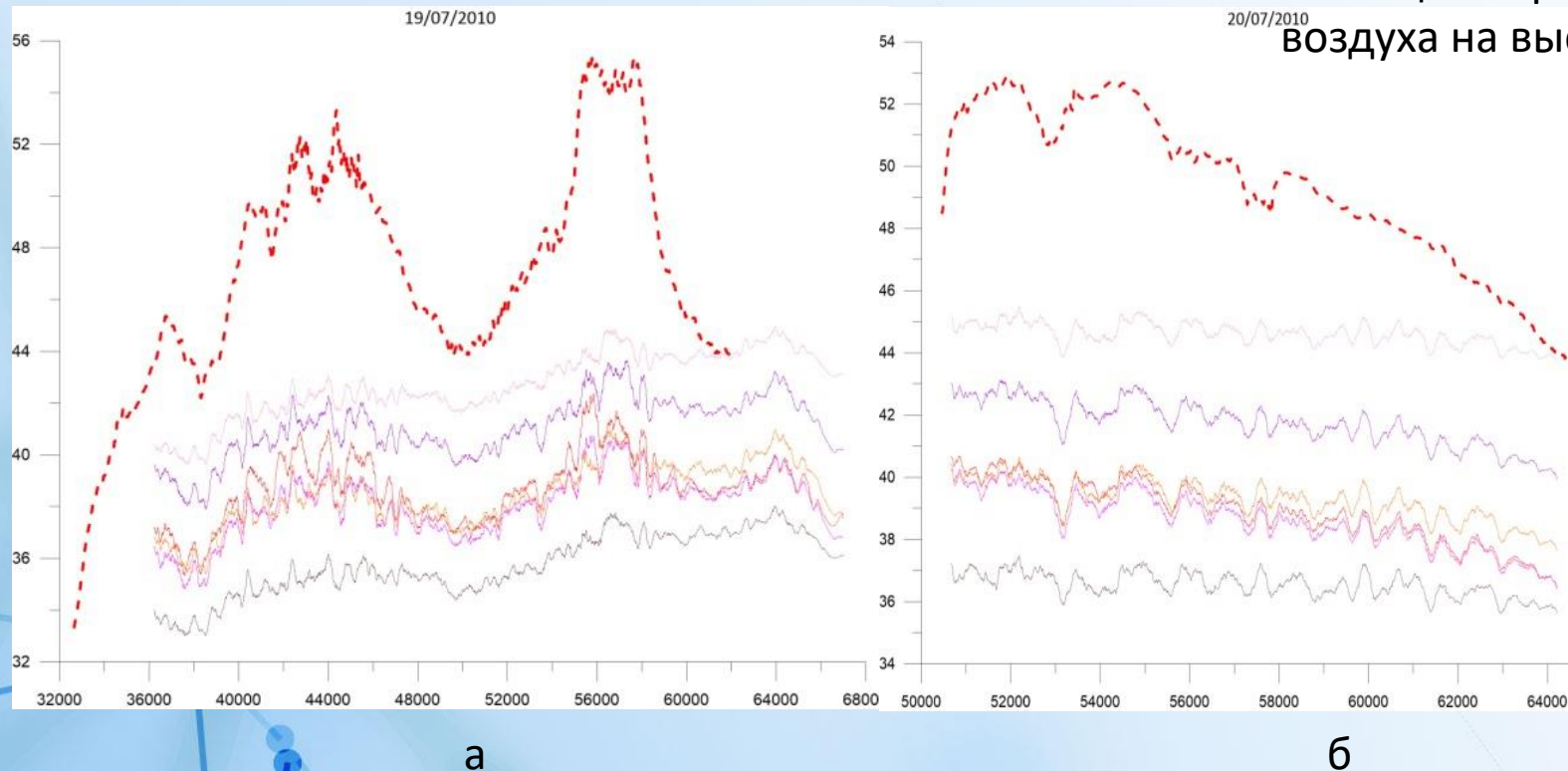
Рис.2. Измерение с использованием датчиков





Об условиях проведения измерений

Таблица.1. Среднечасовые значения метеопараметров
воздуха на высоте 2м



	T, °C	u, м/с
19.07.10 10:00	32.44	2.63
19.07.10 11:00	33.74	2.21
19.07.10 12:00	34.58	2.07
19.07.10 14:00	34.13	3.06
19.07.10 16:00	36.02	2.41
20.07.10 16:00	36.3	5.87
23.07.11 9:21	30.07	8.37
23.07.11 10:21	31.00	8.59
23.07.11 11:21	31.49	9.18
23.07.11 12:21	31.78	9.49
23.07.11 18:48	28.24	8.06
24.07.11 8:45	29.22	7.65
24.07.11 15:37	32.72	8.38

Рис.3. Изменение температур поверхности (а: 19.07.**2010** с 10:02, б: 20.07.**2010** с 14:02), рост с 10 до 12:00 (в: 23.02.**2011** с 9:21)

2

Об условиях проведения измерений

- Нагретая поверхность к вечеру достигает 66°C , а градиент температур 30°C [5]
- Эксперимент, 2010 г. и 2022 г.: слабые и умеренные скорости ветра 2-5 м/с.
- Эксперимент, 2011 г.: устойчивые по величине скорости ветра порядка 8-9 м/с

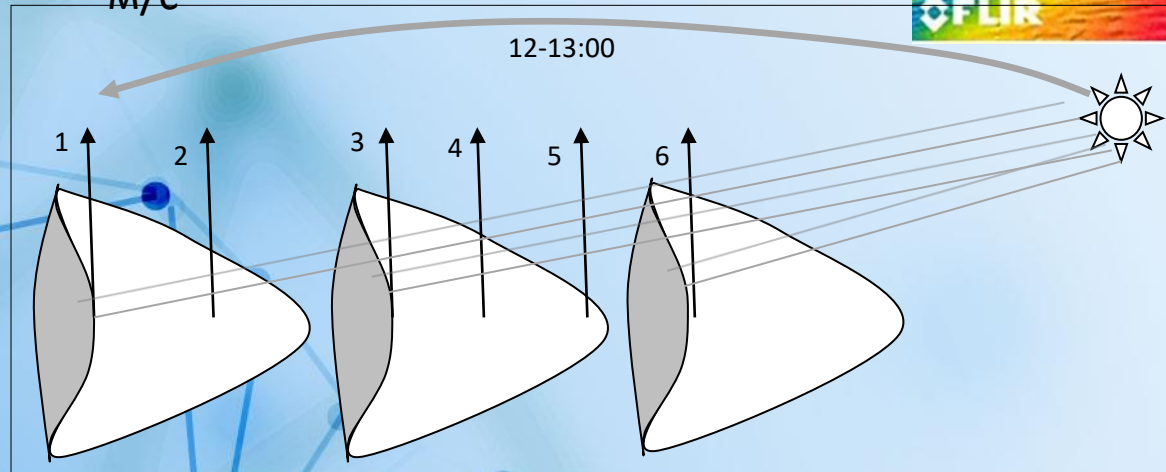
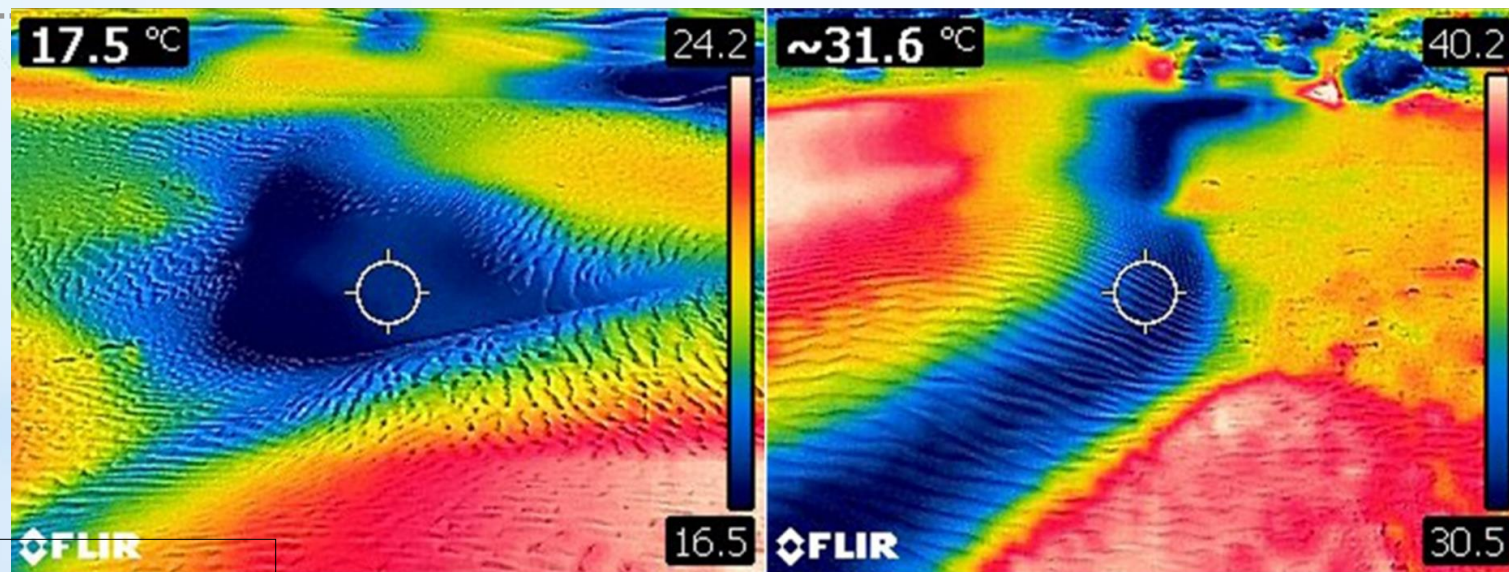
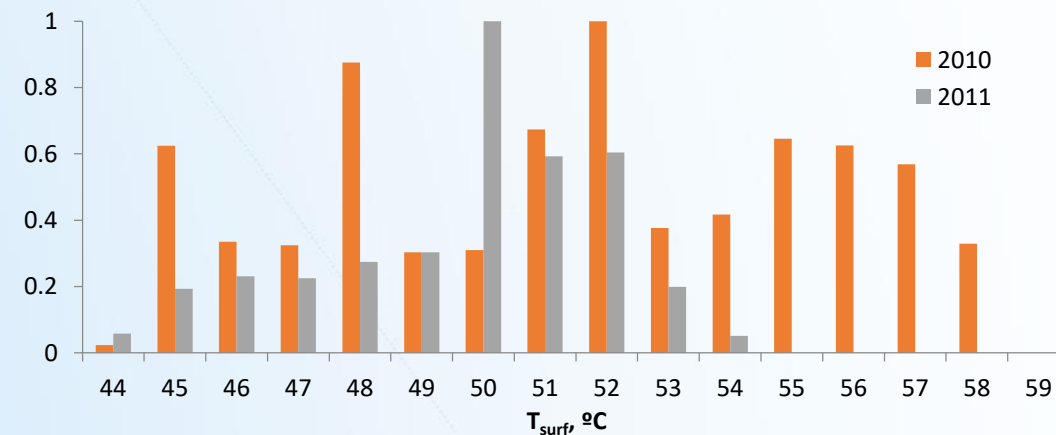


Рис.4. Рисунок 9. Наземная тепловизионная съемка - температурные градиенты [5]

Рис.5. Рисунок 4. Наземная тепловизионная съемка - температурные градиенты [5]



2

Об условиях проведения измерений

Конвективные движения

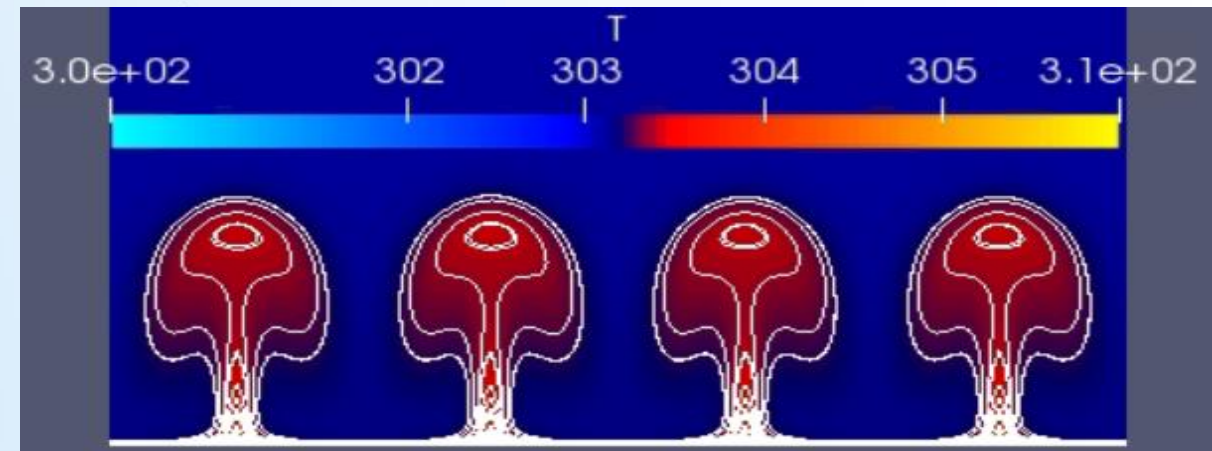
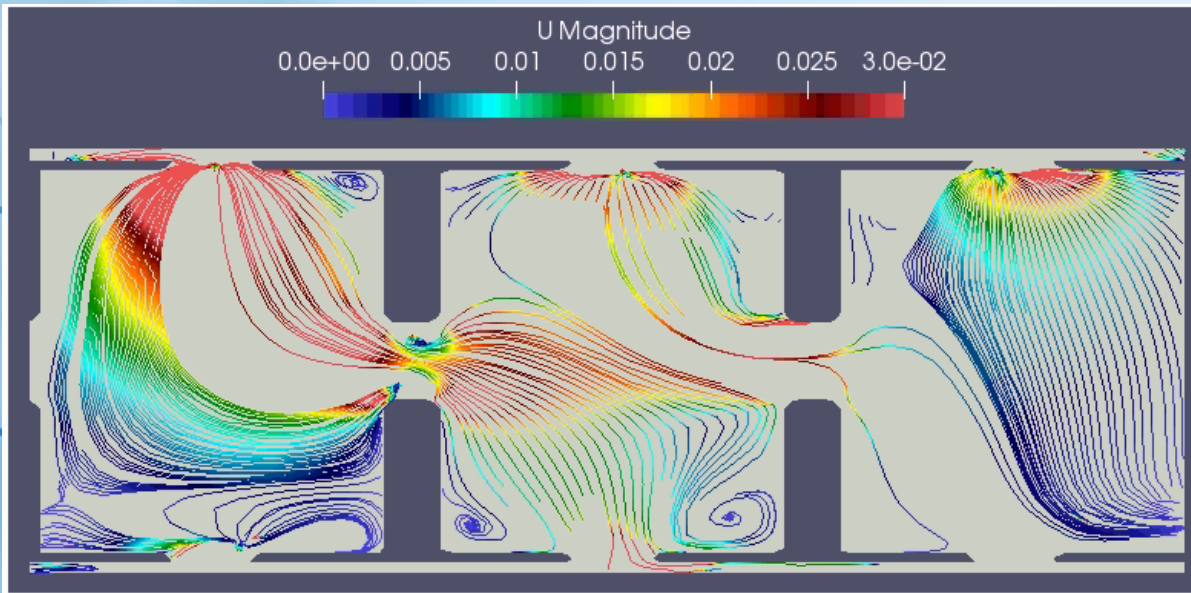
Поверхность – пористая
среда

Поверхность неоднородно
нагрета

Турбулентные движения

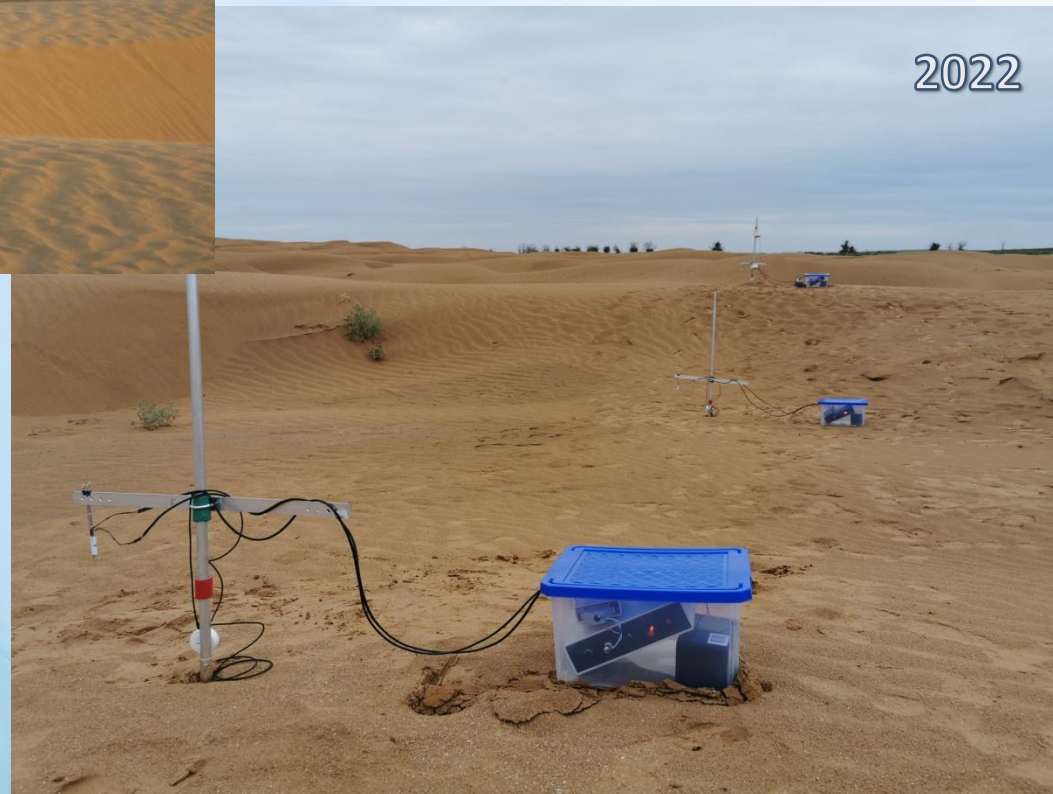
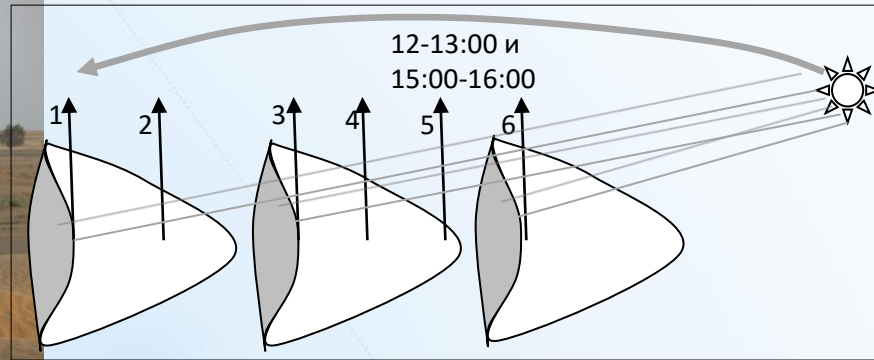
Возникновение восходящих
течений (сопротивление)

Обтекание дюнной
поверхности (21.11 – П5)



2

Об условиях проведения измерений



Дюнные гряды и
солнечная тень

В результате в данных измерений отмечаются всплески с характерной структурой – **рэмпы (ramp)**, они самоподобны (21.11, П9)

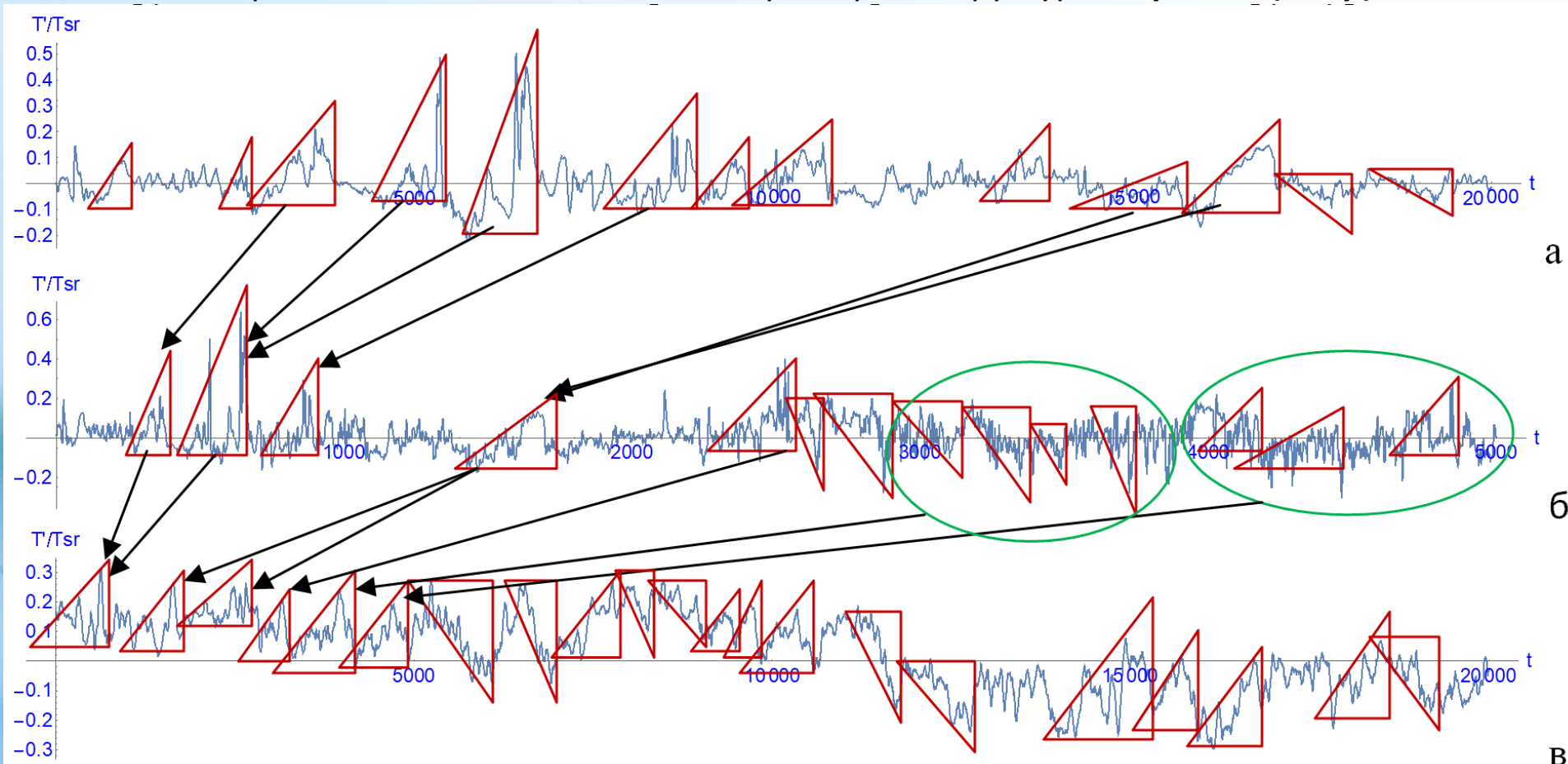


Рис.6. Возникновение самоподобия структур при изменении масштабов визуализации и осреднения. а) представление на интервале 20 с с осреднением 1 с, выделенные структуры имеют длину от 300 до 1000 мс, б) представление на интервале 50 с с коэффициентом $\times 10$, осреднение 10 с, - выделенные структуры имеют длину от 1 до 3 с, в) представление на интервале 200 с с осреднением 100 с, структуры длиной от 1 до 10 с.

Рэмпы выяўлялі в лабораторных эксперыментах і полевых ісследованиях [Коргов, 1998], Тейлором названы асіметрычнымі трэугольнымі волнамі тэмпературы [Taylor, 1958].

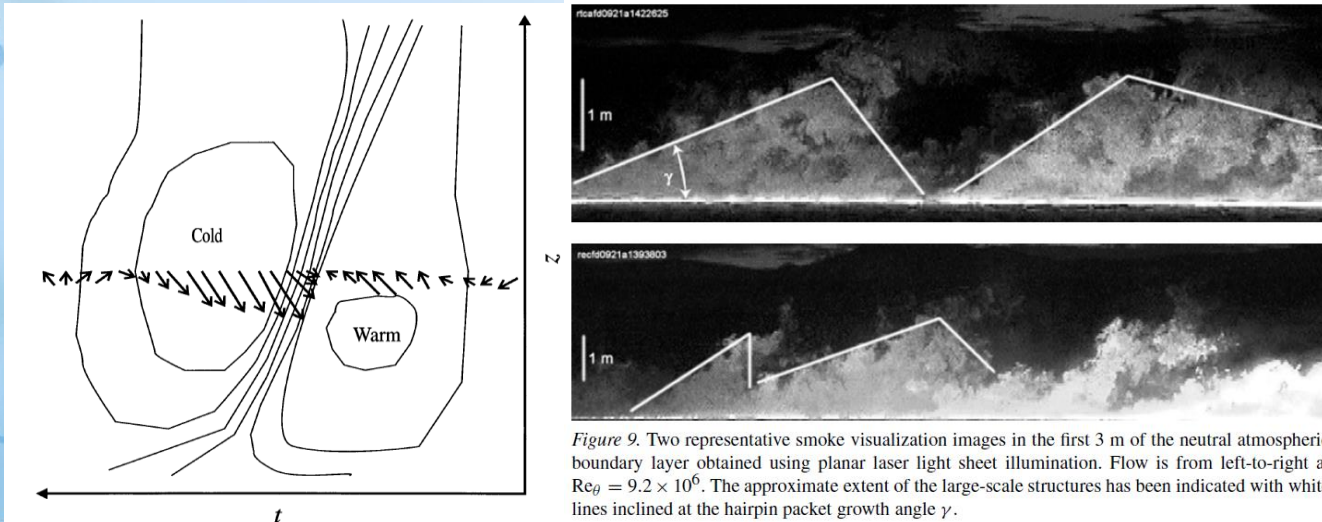
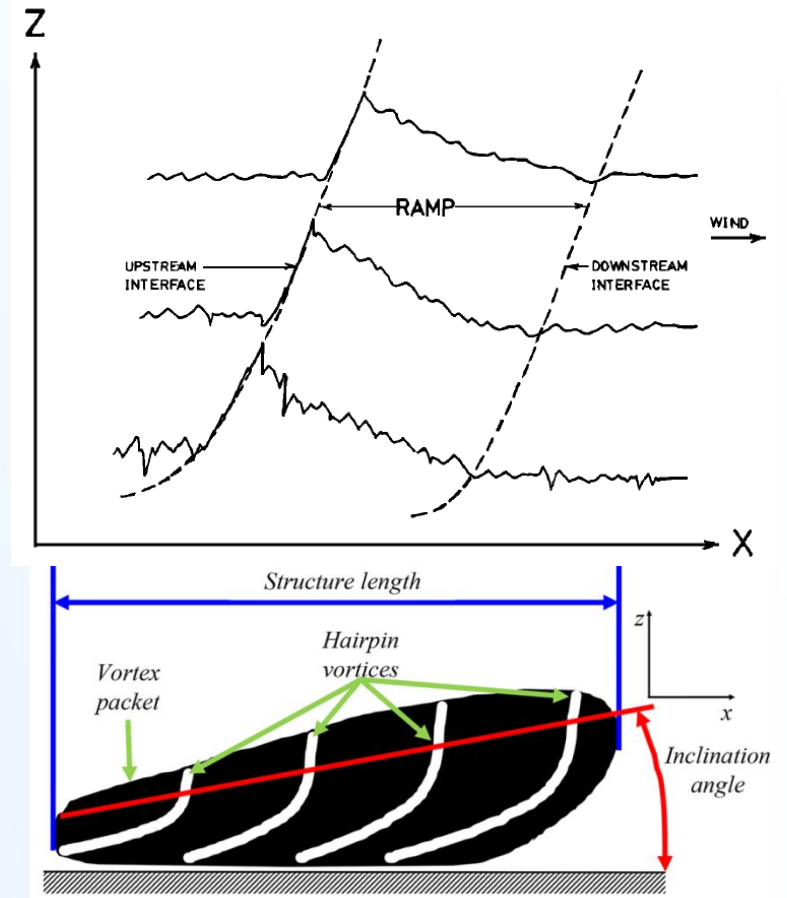


Figure 9. Two representative smoke visualization images in the first 3 m of the neutral atmospheric boundary layer obtained using planar laser light sheet illumination. Flow is from left-to-right at $Re_\theta = 9.2 \times 10^6$. The approximate extent of the large-scale structures has been indicated with white lines inclined at the hairpin packet growth angle γ .



12.Chen W. et al. Coherent eddies and temperature structure functions for three contrasting surfaces. Part I: Ramp model with finite microfront time //Boundary-Layer Meteorology. – 1997. – T. 84. – C. 99-124.

13.Hommema S. E., Adrian R. J. Packet structure of surface eddies in the atmospheric boundary layer //Boundary-Layer Meteorology. – 2003. – T. 106. – C. 147-170.

14.Lotfy E. R., Harun Z. Effect of atmospheric boundary layer stability on the inclination angle of turbulence coherent structures //Environmental Fluid Mechanics. – 2018. – T. 18. – C. 637-659.

15.Phong-Anant D. et al. Features of the organized motion in the atmospheric surface layer //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1980. – T. 85. – №. C1. – C. 424-432.



Рэмпы

Цепочка самоподобных структур для пульсаций температуры и вертикальной составляющей скорости: 0.03 с -> 0.3 с -> 3 с -> 30 с

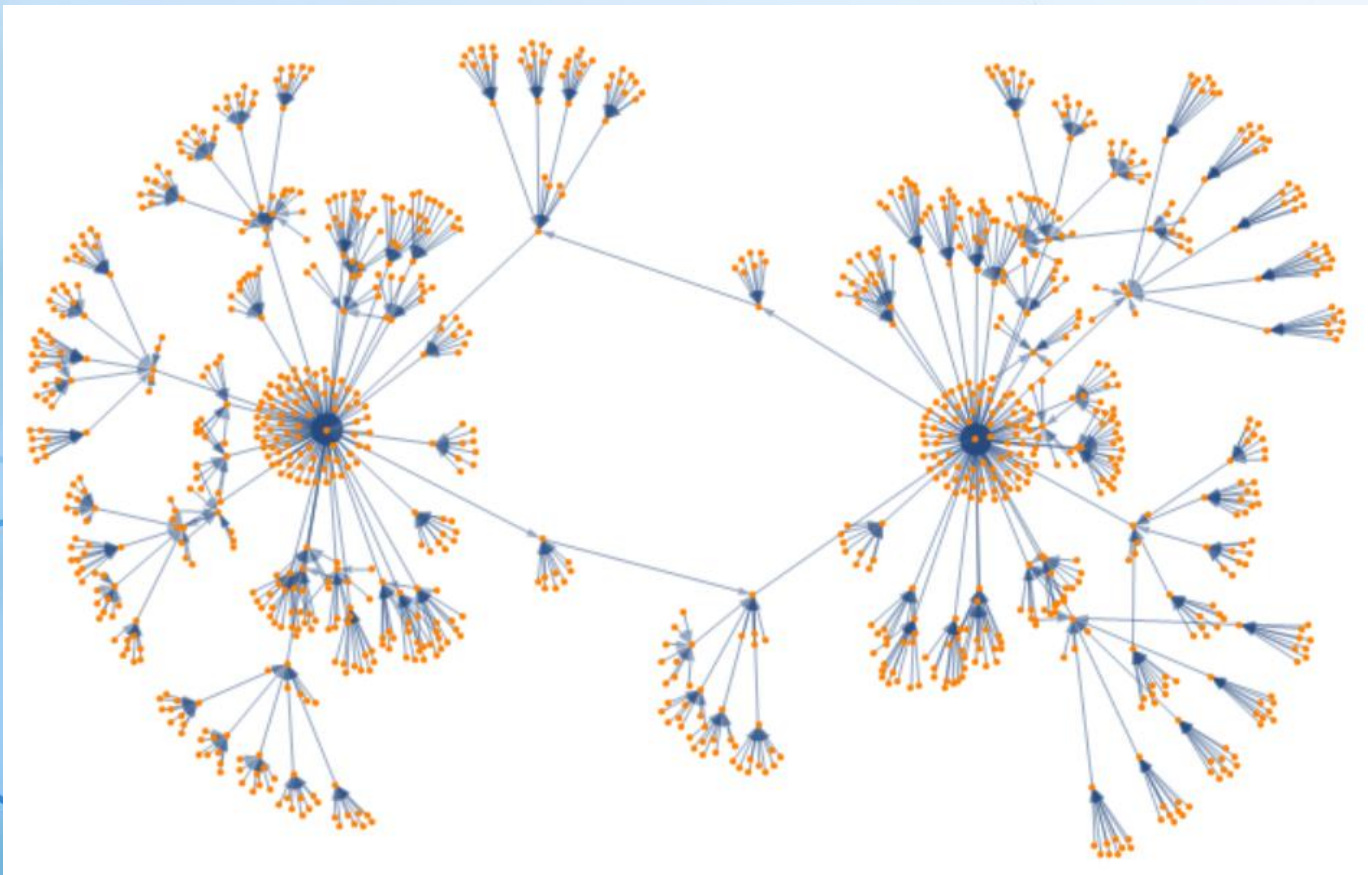


Рис.7. Имитация распределения рэпов в пространстве тепловой структуры

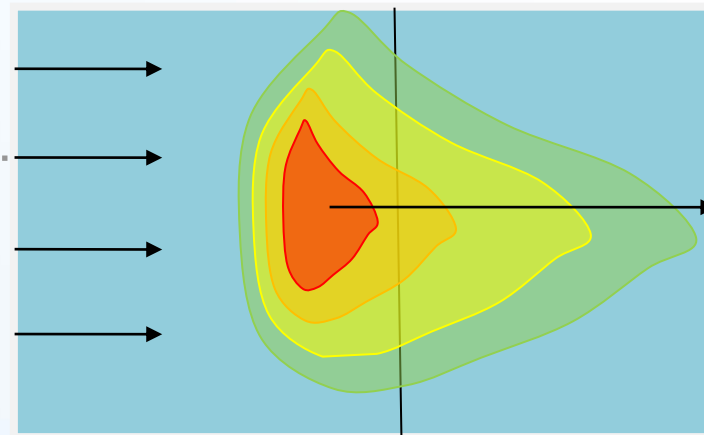


Рис. 8.Схема формирования треугольного сигнала (рэмпов) при перемещении структур под влиянием ветра относительно датчика

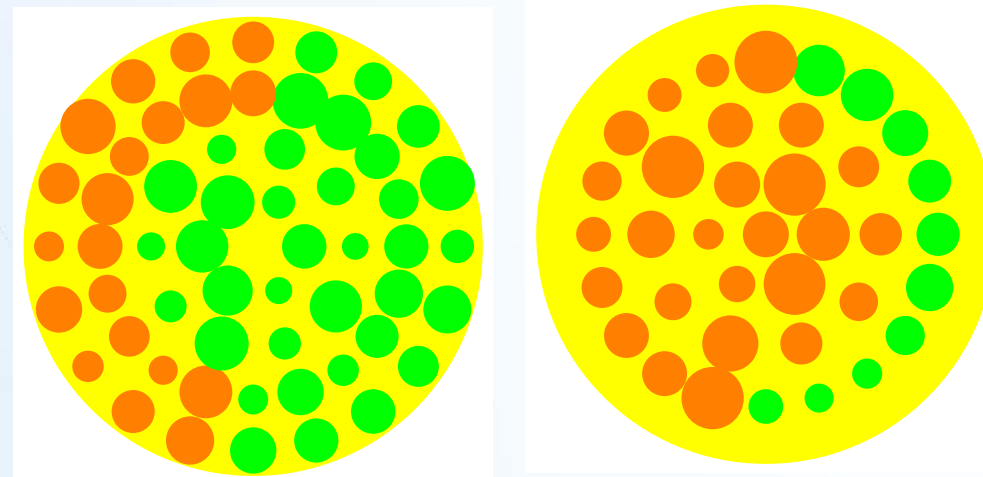


Рис.9. Модельная схема самоподобного рэмп с временной длительностью 3 с (а – рэмп вверх, б – рэмп вниз для температуры)

4

Статистическая обработка

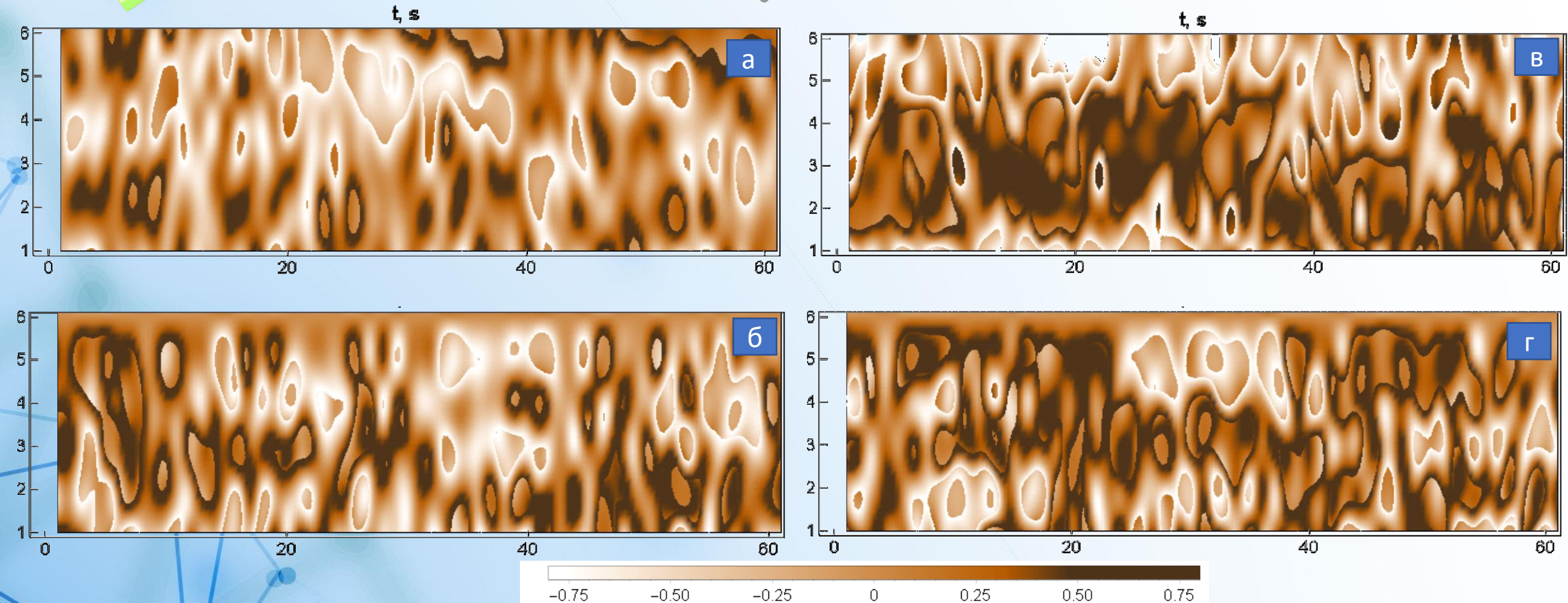


Рис.10. Структуры пульсаций температуры за час (с 10:20 2010 – а и 2011 – б, 13:20 в – 2010 и г – 2011 для измерений на 6 уровнях).

4

Статистическая обработка

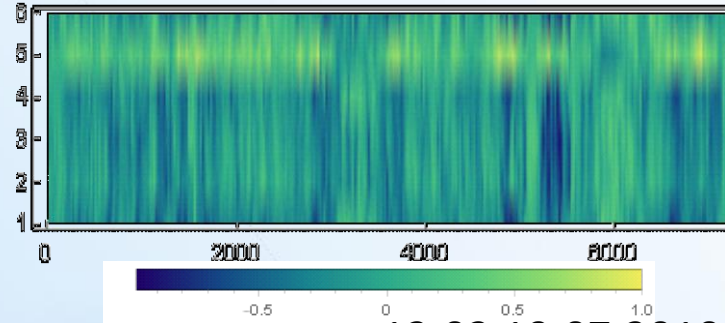
Относительная величина
пульсационных составляющих:

$$\tilde{T}' = \frac{T'}{\langle T_1' \rangle - \langle T_2' \rangle}$$

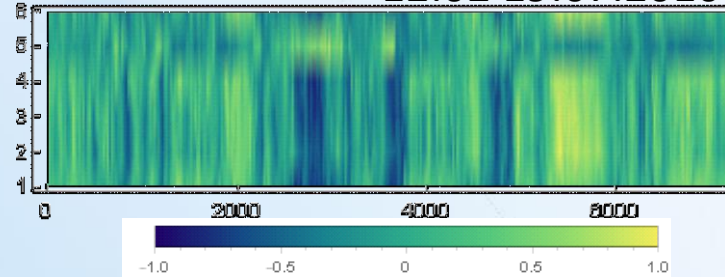
$\langle T_1' \rangle$ - максимальное и $\langle T_2' \rangle$ -
минимальное значения
пульсационных составляющих
на выбранном интервале
отображения

периодическая структура с
нитевидными
положительными и
отрицательными
составляющими

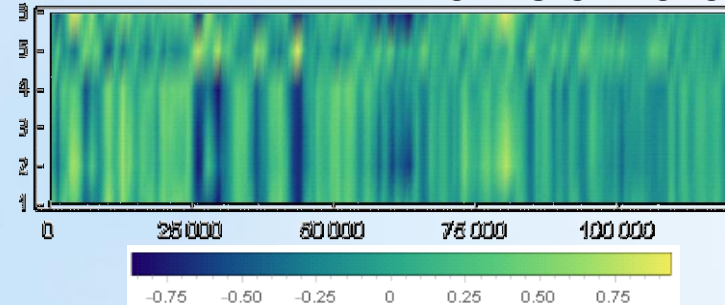
10:02 19.07.2010



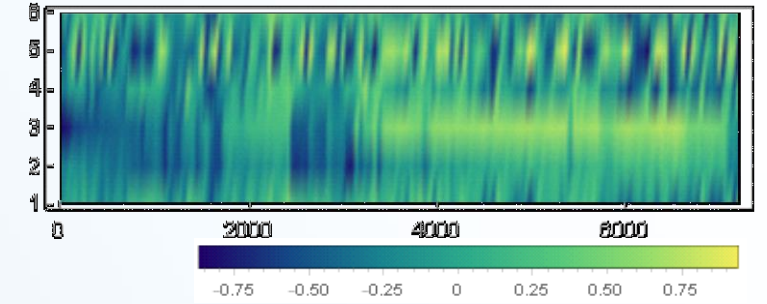
12:02 19.07.2010



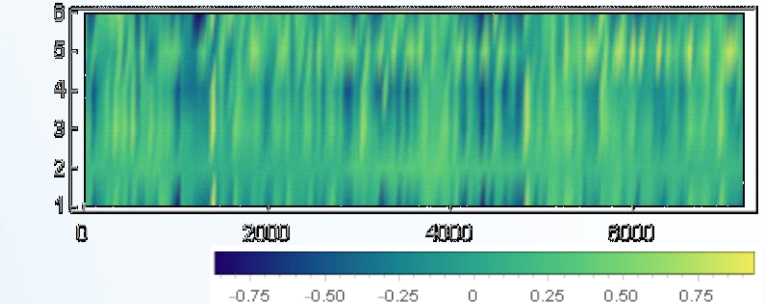
14:02 19.07.2010



8:38 24.07.2011



9:21 23.07.2011



15:45 24.07.2011

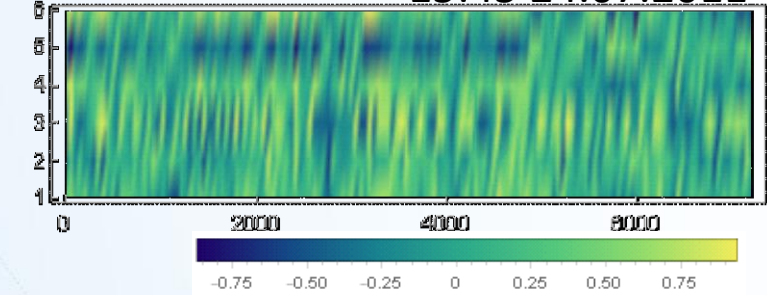
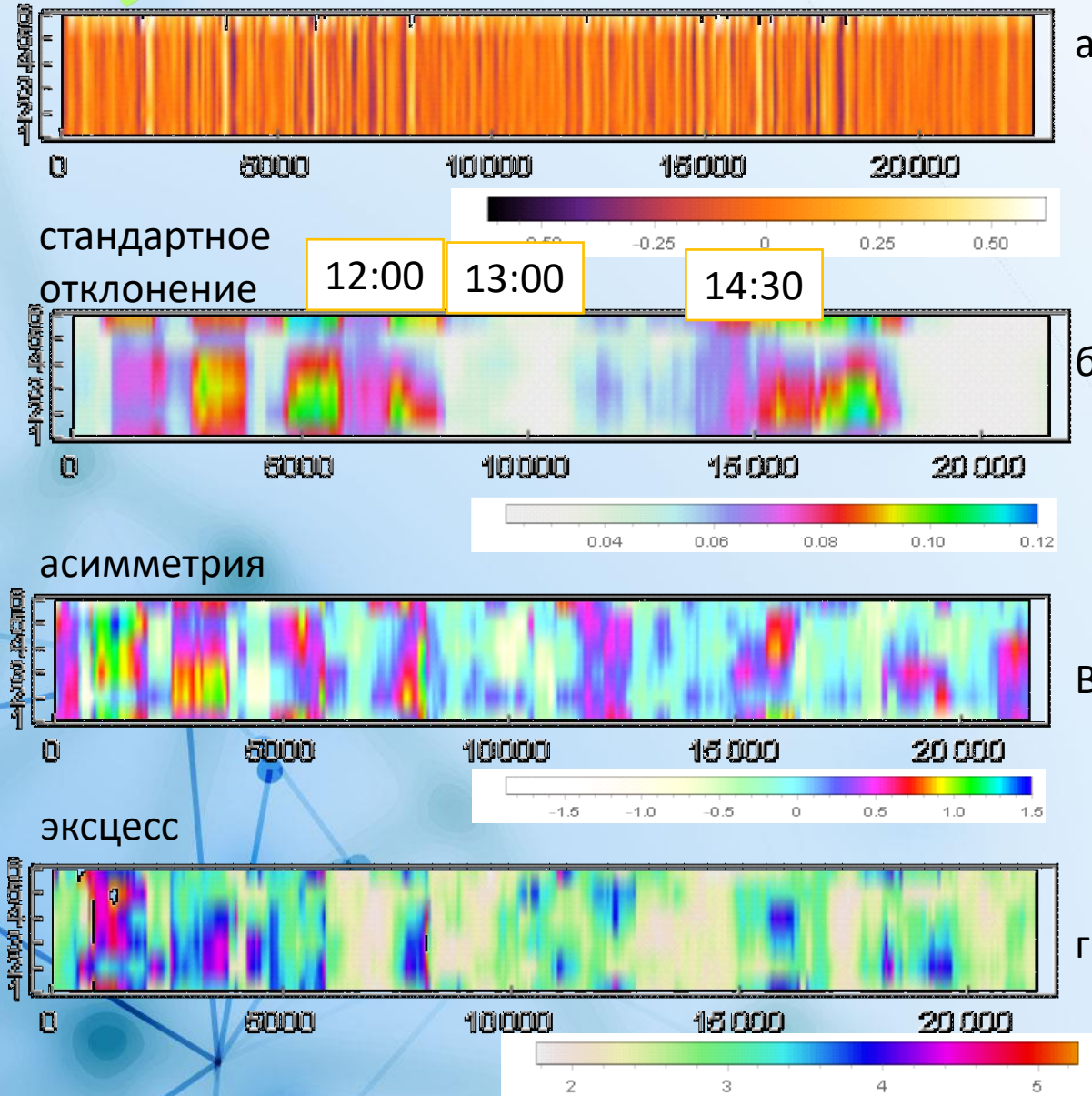


Рис.10. Изменение с высотой относительных значений пульсационных составляющих температуры по данным 2010 и 2011 годов в течение 1 минуты и 20 секунд (7200 значений)

Статистическая обработка



Статистические характеристики пульсационных составляющих зависят от времени дня

- Наибольшее число и амплитуда всплесков теплового потока отмечается с 10:00 до 12:00
- Величины **стандартного отклонения** наибольшие с 11:00 до 11:30 и с 14:00 до 14:30
- **Асимметрия** наибольшая в утреннее время с 10:00 до 10:30 (до 12:00 ослабевает)
- **Эксцесс** имеет наибольшие значения утром до 10:30

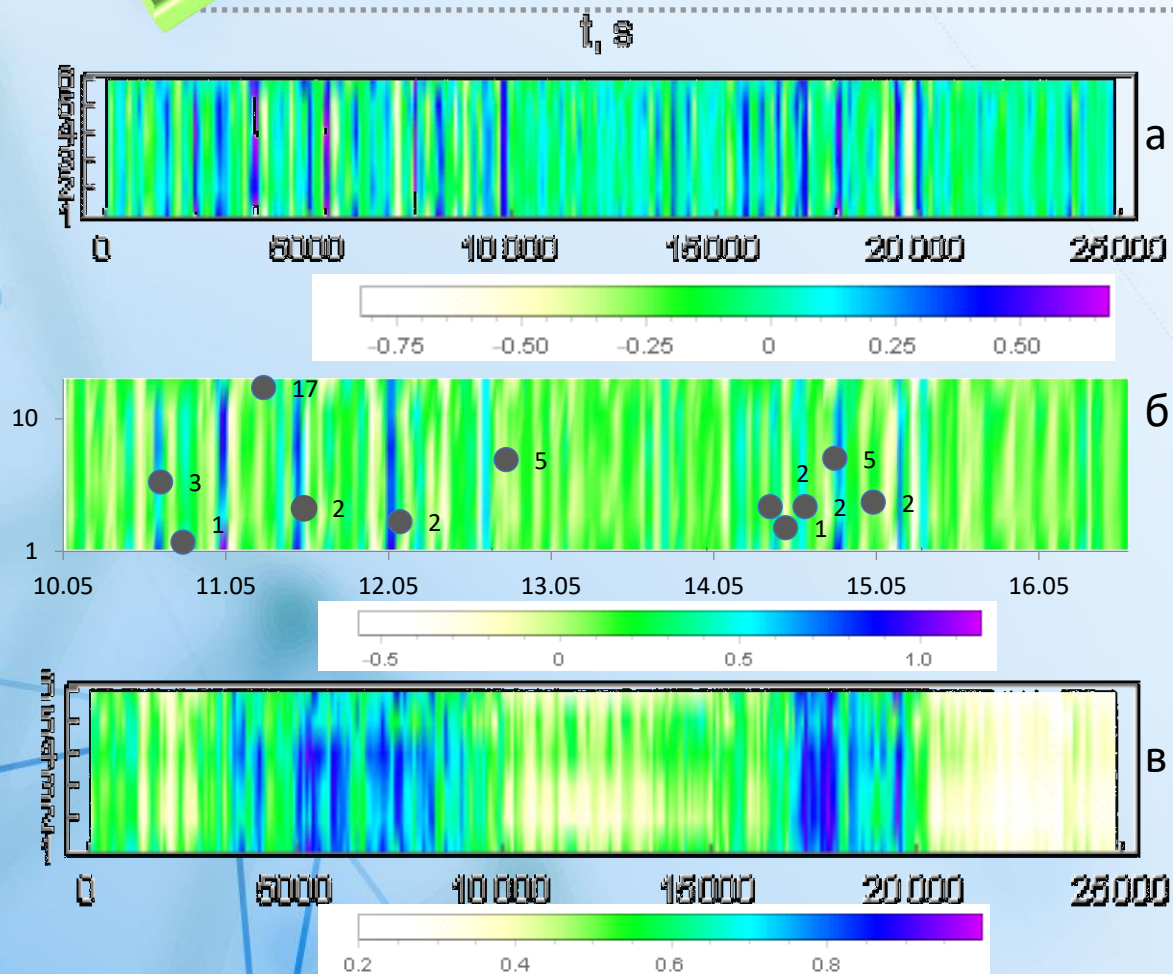
Рис.10. Осредненные за 20 минут пульсационные составляющие с вычетом 2хминутных трендов (а), стандартное отклонение (б), асимметрия (в) и эксцесс (г) для временного интервала с 10 (0) до 16:00 (24000, 1 час – 4000 ед.)

Изменение характера пульсаций в течение дня может быть связано с большей степенью неоднородности нагрева поверхности за счет возникновения солнечной тени [6]

6. Malinovskaya E. A., Chkhetiani O. G., Azizyan G. V. On the Structure of Temperature Pulsations near the Surface under Convective Conditions //Doklady Earth Sciences. 2024. V. 516(1). P. 888-895.

3

Статистическая обработка



12 событий увеличения относительных значений пульсационных составляющих на всех уровнях, когда значения превышают $|0.5|$

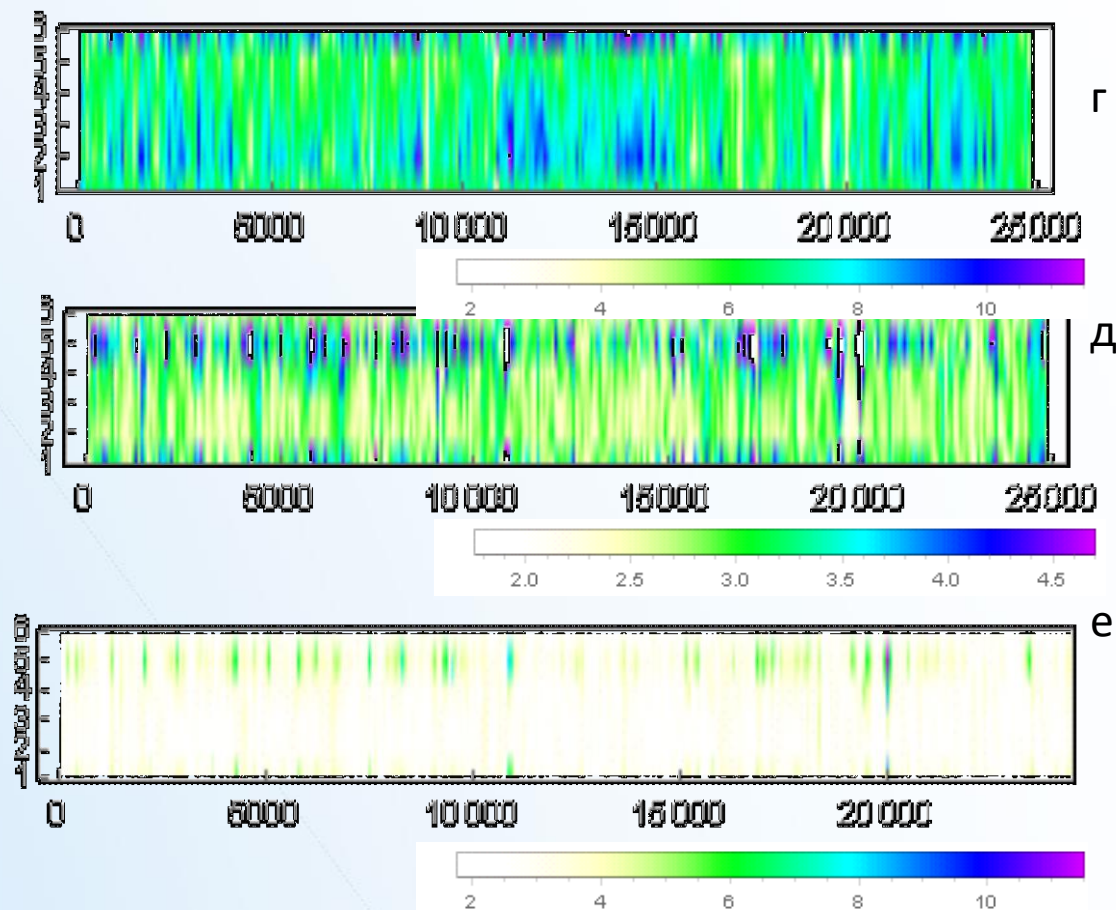
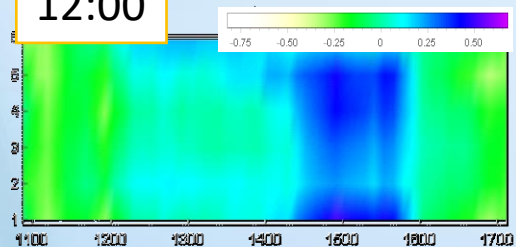


Рис.11. Расчеты для каждых 100 с пульсационных составляющих (с вычетом 5хминутных трендов): а – относительное среднее значение б – длительность в минутах событий увеличения средних значений пульсационных составляющих на фоне этих значений, в - стандартное отклонение, г - асимметрия и д, е - эксцесс для временного интервала с 10 до 16:00

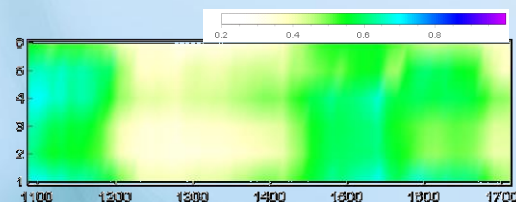
3

Статистическая обработка

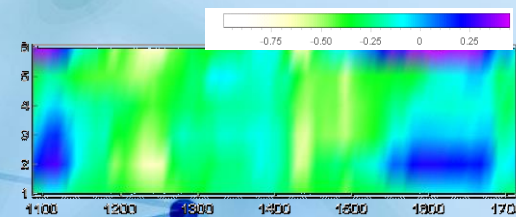
12:00



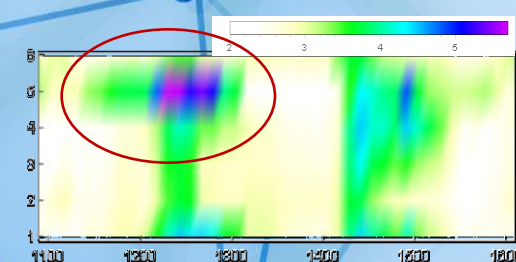
а



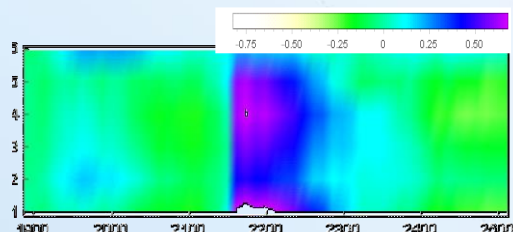
б



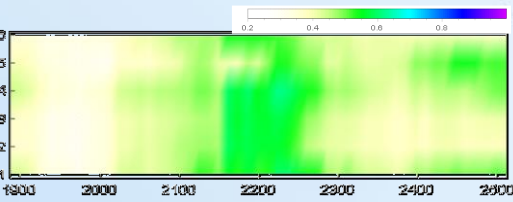
в



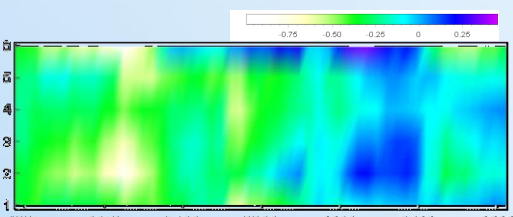
г



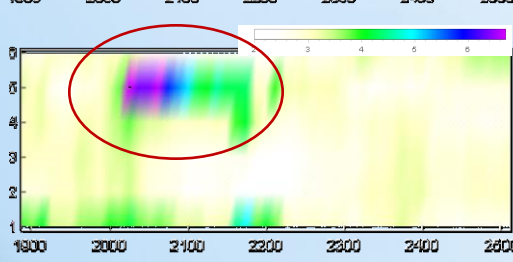
а



б

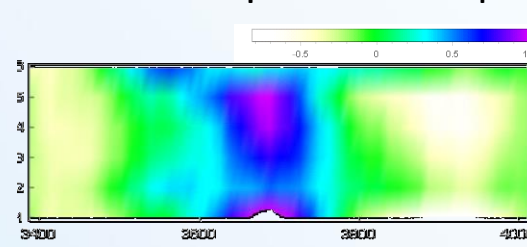


в

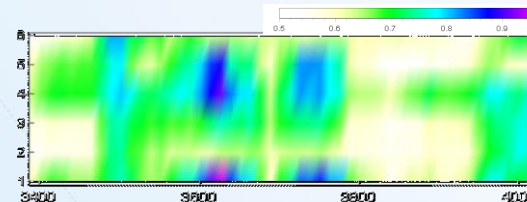


г

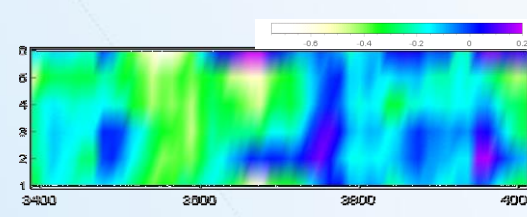
события увеличения относительных значений
пульсационных составляющих на всех уровнях, когда
значения превышают $|0.5|$



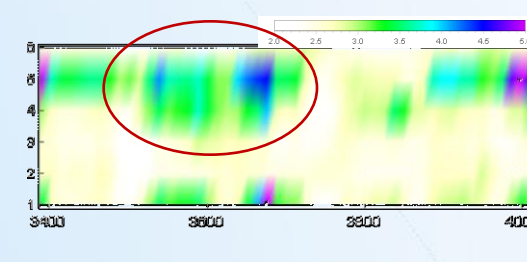
а



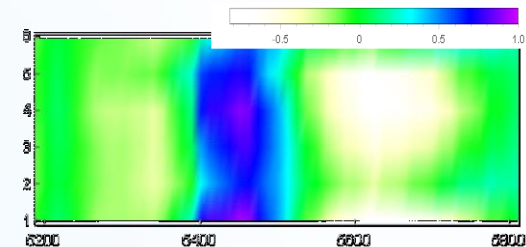
б



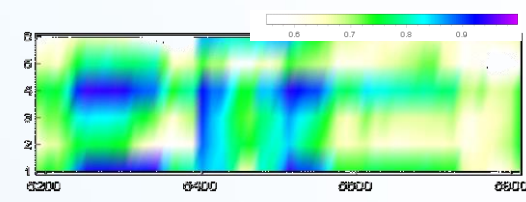
в



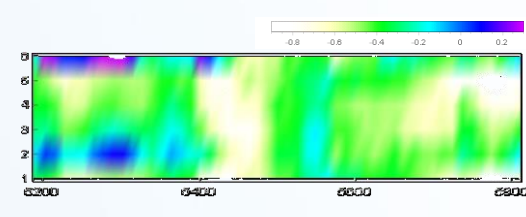
г



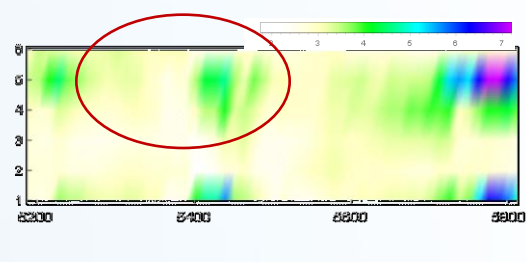
а



б



в



г

Рис.12. Примеры изменения четырех выбранных параметров в момент усиления средних значений
пульсационных составляющих: а - среднее значение б - стандартное отклонение, в - асимметрия и г - эксцесс для
временного интервала с 10 до 16:00

Для исследования потоков над нагретой поверхностью используются уравнения движения в приближении Буссинеска:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_i^2} + g\beta\theta \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} + v_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} = \chi \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i^2}$$

где θ - изменение температуры, χ - коэффициент теплопроводности, β - коэффициент расширения, $v_{i,j}$ - компоненты скорости воздушного потока

$$\tau \sim \left(\beta g \left| \frac{dT}{dz} \right| \right)^{-1/2} = N^{-1}$$

$N^2 = \beta g \left| \frac{dT}{dz} \right|$ – квадрат частоты Бранта-Вяйсяля, независимый в данном случае от масштаба. Это характерный временной масштаб экспоненциального роста (или колебаний) тепловых неоднородностей при наличии градиента температуры

Откуда получаем $\langle \theta^2 \rangle \sim \frac{\varepsilon_\theta}{N}$

$$\Phi(k) \sim \frac{\varepsilon_\theta}{N} k^{-1}$$

С учётом приповерхностного градиента температуры :

$$\frac{\langle \theta^2 \rangle}{\tau} \sim \varepsilon_\theta + \langle v_z \theta \rangle \left| \frac{dT}{dz} \right|, \quad \frac{dT}{dz} < 0,$$

$$\frac{\langle v_z \theta \rangle}{\tau} \sim \varepsilon_{v_z \theta} + \langle v_z^2 \rangle \left| \frac{dT}{dz} \right| + \beta g \langle \theta^2 \rangle,$$

$$\frac{\langle v_z^2 \rangle}{\tau} \sim \varepsilon_z + \beta g \langle v_z \theta \rangle$$

Для $\langle v_z \theta \rangle$ и $\langle v_z^2 \rangle$ можно пренебречь на крупных масштабах диссипацией. Основным источником для $\langle v_z \theta \rangle$ является градиент температуры, так что здесь можно опустить $\beta g \langle \theta^2 \rangle$ для пульсаций температуры основным фактором является скорость выравнивания тепловых неоднородностей, характеризуемая ε_θ

$$\frac{\langle \theta^2 \rangle}{\tau} \sim \varepsilon_\theta, \quad \frac{\langle v_z \theta \rangle}{\tau} \sim \langle v_z^2 \rangle \left| \frac{dT}{dz} \right|, \quad \frac{\langle v_z^2 \rangle}{\tau} \sim \beta g \langle v_z \theta \rangle$$

Характерное время в области инерционного интервала:

$$\tau_{kolm} \sim \frac{l}{v_l} = \frac{l}{\varepsilon^{1/3} l^{1/3}} = \frac{l^{2/3}}{\varepsilon^{1/3}}$$

$$l > \varepsilon^{1/2} \left(\beta g \left| \frac{dT}{dz} \right| \right)^{-3/4} \sim 5 - 7 \text{ см}$$

При прогреве поверхности теплые массы поднимаются при превышении порогового значения разности температур:

$$\frac{\langle v_z^2 \rangle}{\tau} > \beta g \langle v_z \theta \rangle.$$

малость пульсаций температуры определяется условиями:

$$\langle v_z^2 \rangle \left| \frac{dT}{dz} \right| \sim \beta g \langle \theta^2 \rangle \quad \varepsilon_\theta \sim -\langle v_z \theta \rangle \left| \frac{dT}{dz} \right|$$

А возникновение пульсаций температуры связано с пороговым значением разности температур:

$$\langle \theta^2 \rangle > \tau \langle v_z \theta \rangle \left| \frac{dT}{dz} \right|.$$

движения горизонтального ветра или относительно слабыми тепловыми потоками

$$F(\omega) \sim \frac{\omega^{-5/3}}{\varepsilon^{1/3}} \varepsilon_\theta.$$

$$\begin{aligned} \frac{\langle \theta^2 \rangle}{\tau} &\sim \varepsilon_\theta + \langle v_z \theta \rangle \left| \frac{dT}{dz} \right|, \quad \frac{dT}{dz} < 0, \\ \frac{\langle v_z \theta \rangle}{\tau} &\sim \varepsilon_{v_z \theta} + \langle v_z^2 \rangle \left| \frac{dT}{dz} \right| + \beta g \langle \theta^2 \rangle, \\ \frac{\langle v_z^2 \rangle}{\tau} &\sim \varepsilon_z + \beta g \langle v_z \theta \rangle \end{aligned}$$

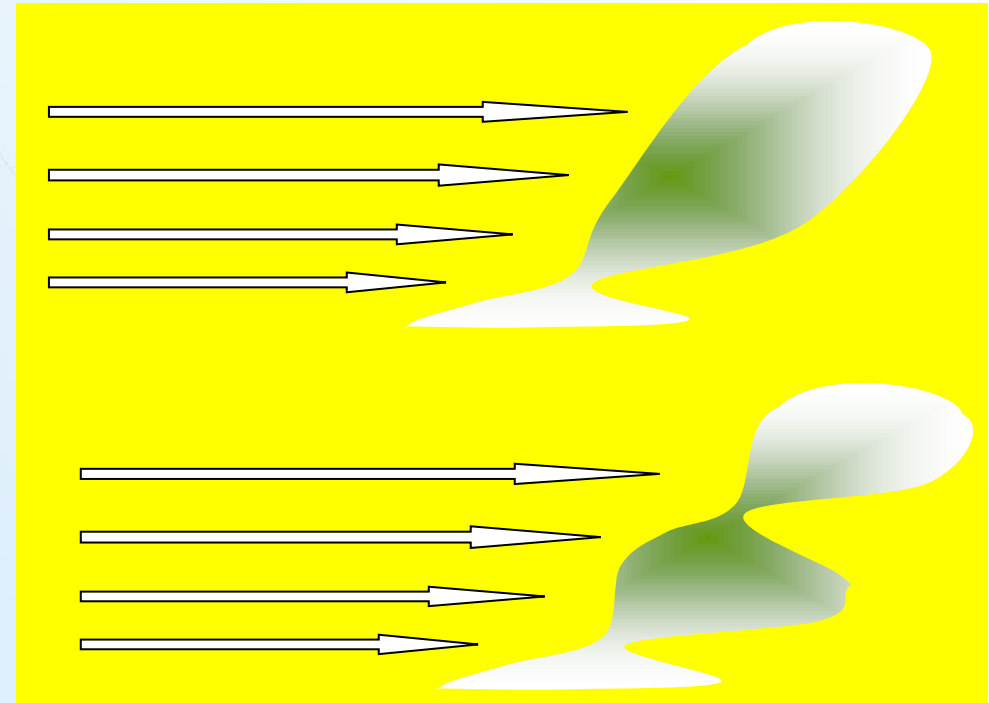


Рис.13. Возможная форма тепловых структур при ветре

Функции спектральной плотности «-1/3» и «-4/3»

Устойчивые колебания значений пульсаций температуры могут быть описаны условием:

$$\frac{\langle \theta^2 \rangle}{\tau} \sim \langle v_z \theta \rangle \left| \frac{dT}{dz} \right|,$$

В случае изменений теплового потока:

$$\frac{\langle v_z \theta \rangle}{\tau} \sim \beta g \langle \theta^2 \rangle,$$

и поддерживаемого теплового потока в условиях естественного градиента:

$$\langle v_z^2 \rangle \left| \frac{dT}{dz} \right| \sim \beta g \langle \theta^2 \rangle,$$

Функция спектральной плотности:

$$F(\omega) \sim -\frac{\varepsilon^{4/3}}{(\beta g)^2} \omega^{-1/3}.$$

$$\begin{aligned} \frac{\langle \theta^2 \rangle}{\tau} &\sim \varepsilon_\theta + \langle v_z \theta \rangle \left| \frac{dT}{dz} \right|, \quad \frac{dT}{dz} < 0, \\ \frac{\langle v_z \theta \rangle}{\tau} &\sim \varepsilon_{v_z \theta} + \langle v_z^2 \rangle \left| \frac{dT}{dz} \right| + \beta g \langle \theta^2 \rangle, \\ \frac{\langle v_z^2 \rangle}{\tau} &\sim \varepsilon_z + \beta g \langle v_z \theta \rangle \end{aligned}$$

Турбулентный поток тепла $\langle v_z \theta \rangle$ зависит только от диссипации энергии.

Пульсации температуры зависят от скорости выравнивания тепловых неоднородностей:

$$\frac{\langle \theta^2 \rangle}{\tau} \sim \varepsilon_\theta,$$

Пульсации вертикальной составляющей турбулентной энергии $\langle v_z^2 \rangle$ зависят от величины теплового потока:

$$\frac{\langle \theta^2 \rangle}{\tau} \sim \varepsilon_\theta, \quad \frac{\langle v_z \theta \rangle}{\tau} \sim \varepsilon_{v_z \theta}, \quad \frac{\langle v_z^2 \rangle}{\tau} \sim \beta g \langle v_z \theta \rangle.$$

Функция спектральной плотности:

$$F_k \sim \frac{\varepsilon_\theta \varepsilon^{1/3}}{(\beta g \varepsilon_{v_z \theta})^{1/2}} \omega^{-\frac{4}{3}}.$$

Функции спектральной плотности

Перенос энергии между двумя вихрями с различными волновыми числами осуществляется только за счет градиентов скорости и температуры [6,7].

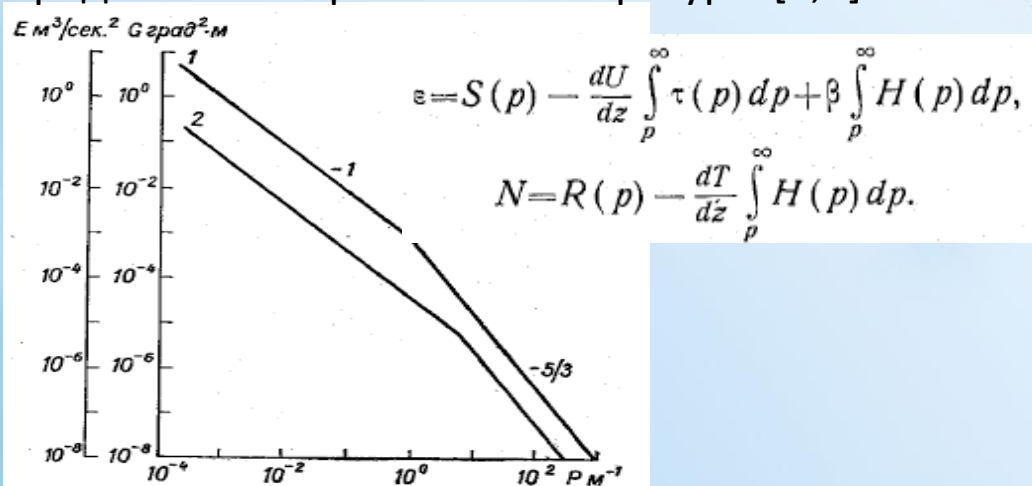


Рис. 1а. Спектры энергии турбулентности (кривая 1) и интенсивности пульсаций температуры (кривая 2) для случая 1.

Случай	$\varepsilon, \frac{м^2}{сек^3}$	$N, \frac{град^2}{сек}$	$\frac{dU}{dz}, \frac{м/сек}{100 м}$	$\frac{dT}{dz}, \frac{град}{100 м}$
1	10^{-5}	10^{-6}	2	+1 — устойчивость
2	10^{-5}	10^{-4}	2	-1 — неустойчивость

При турбулентном движении неоднородно нагретой среды «-1» получается для диссипативного вязко-конвективного масштаба [8].

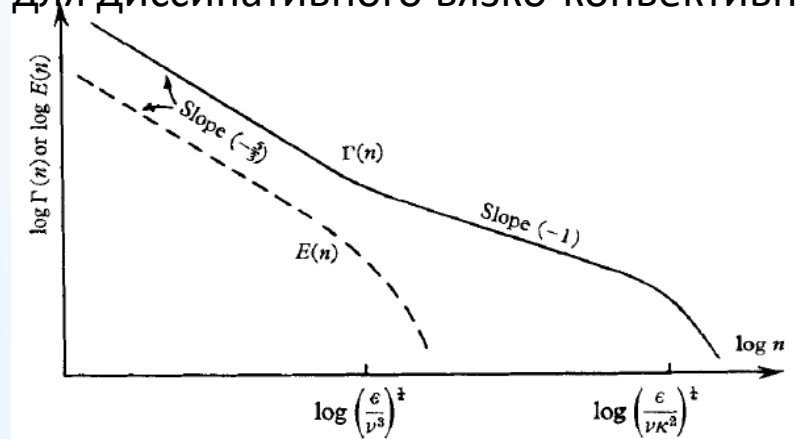


FIGURE 1. Spectra of θ and u in the equilibrium range of wave-numbers for the case $\nu \gg \kappa$.

Ситуация в определённом смысле схожа с турбулентностью потока с поперечным сдвигом скорости, где также получается такой спектр на крупных масштабах низких частотах.

«-1» характерен для субмезомасштабные структур (100-300 м) в атмосферном пограничном слое [10],

В [11] получен спектр со степенью «-1» в предположении независимости турбулентной структуры крупных вихрей от высоты (по данным наблюдений до 50 м)

6. Гисина Ф.А. О влиянии градиентов средней скорости и температуры на спектральные характеристики турбулентности. *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1966, Vol. 2, 8, p. 804.
7. Гисина Ф. А. Расчет основных спектральных характеристик турбулентности в термически стратифицированной атмосфере. *Trudy-Leningradskii gidrometeorologicheskii institut*. 1968, Vol. 34, p. 49.
8. Batchelor G. K. Small-scale variation of convected quantities like temperature in turbulent fluid Part 1. General discussion and the case of small conductivity // *Journal of fluid mechanics*. — 1959. — Т. 5. — №. 1. — С. 113-133.
9. Martens C.P. Spectrum of turbulence with temperature gradient (in the atmosphere). *Journal of Physics A: Mathematical and General*. 1976, Vol. 9, 10, p. 1751.
10. Чхетиани О. Г., Вазаева Н. В. Об алгебраических возмущениях в атмосферном пограничном слое // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. — 2019. — Т. 55. — №. 5. — С. 62-75.
11. Яглом А.М. Структура турбулентности в неустойчиво стратифицированном приземном пограничном слое // *Отчет*. М. : с.п., 1987.

4

Функции спектральной плотности

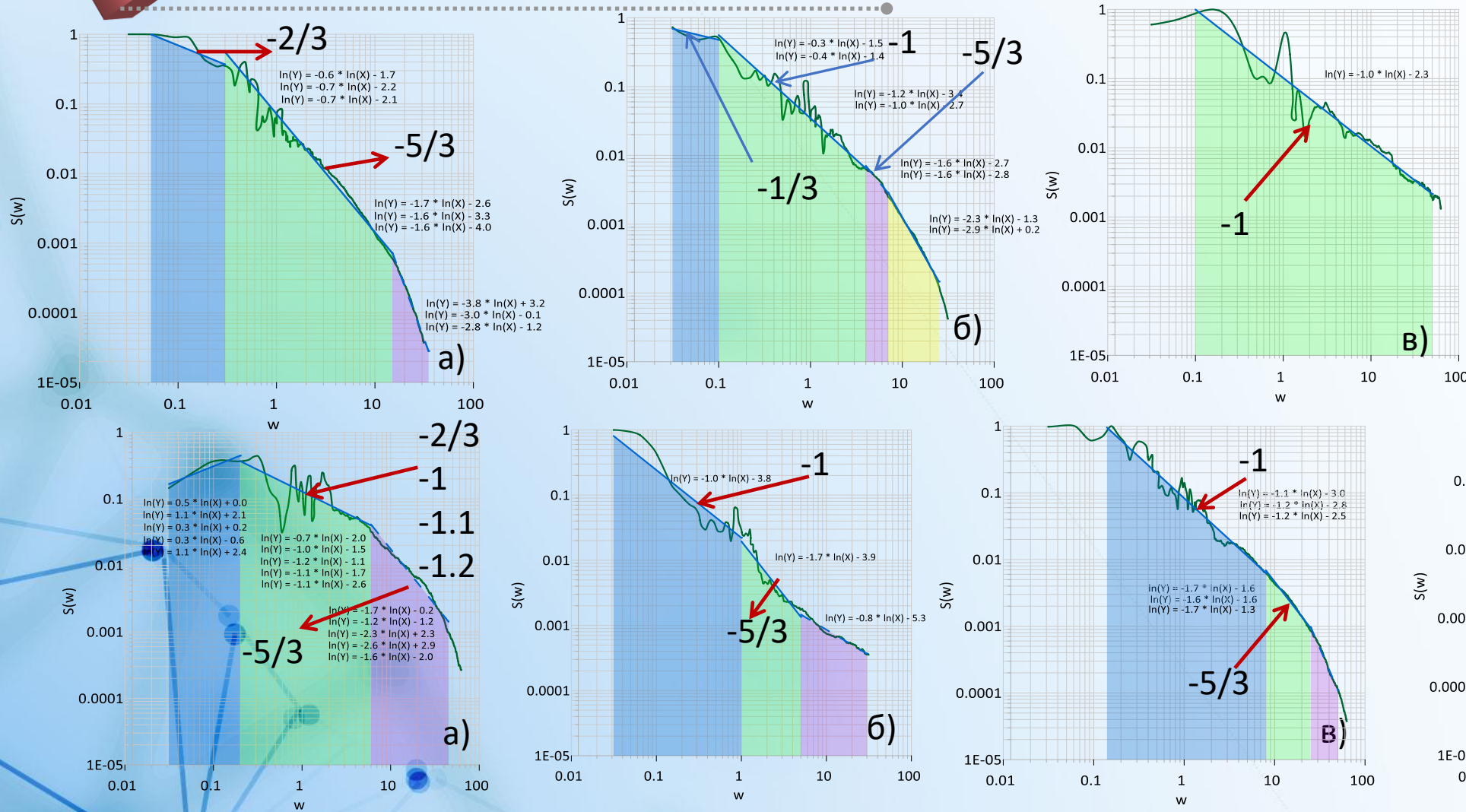


Рис.14. Функции спектральной плотности для температуры: а – **10:00**, 19.07.2010 – уровни 4,5,6; б – уровни 2,3; в – уровень 1

Рис.15. Рис.10. Различия в спектральных функциях: функции приведены последовательно сверху **вниз** на **каждом графике по порядку уровней наблюдения**, 23.07 в **9:21** а – для уровней 1,3-6 и б – для 2, 24.11.2011 в 8:45 для уровней 1,4,6, в и г для 2,3

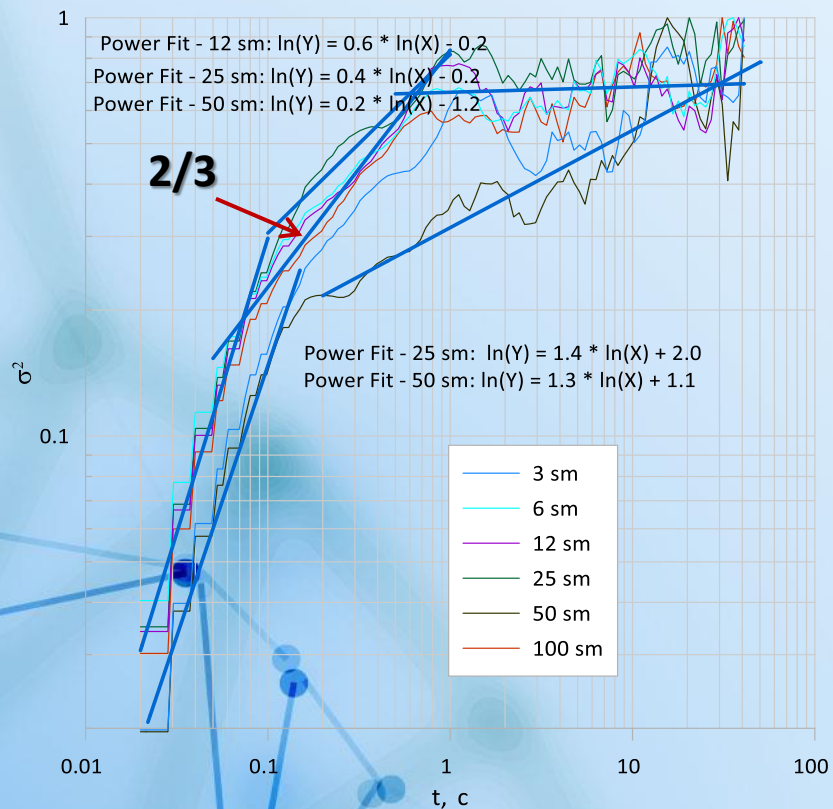


Структурные функции

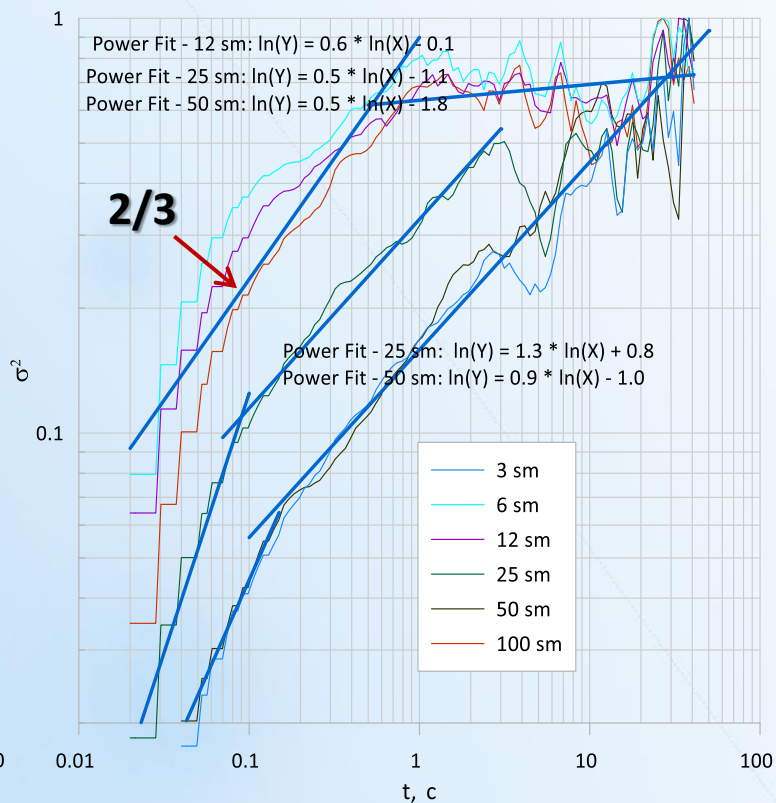
τ, c

Структурные функции относятся не к статистическим и устойчивым значениям характеристик турбулентного потока, а к разностям значениям в двух точках:

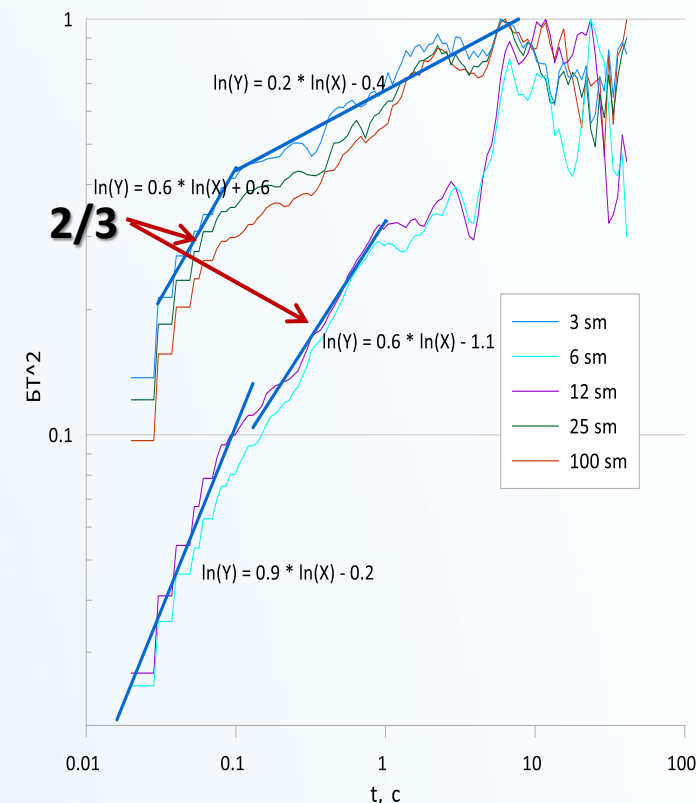
$$H_n(\tau) = \overline{[T'(t+\tau) - T'(t)]^n}, n = 2, 3, 4, 5$$



10:00 19.07.2011



12:00 19.07.2011



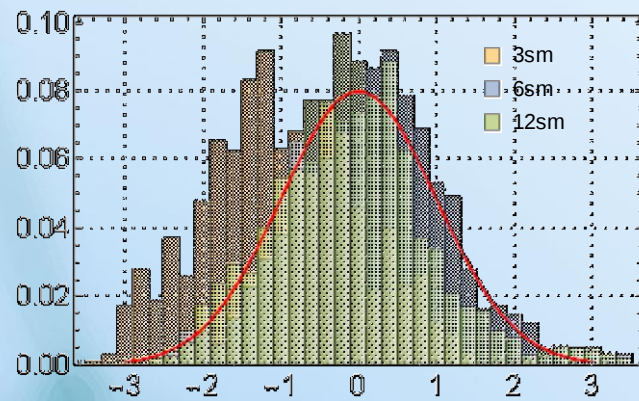
9:00 24.07.2010

Рис. 18. Вид структурных функций от 2ого порядка

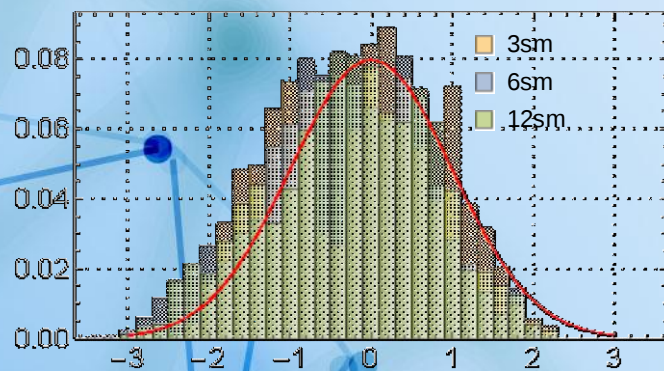
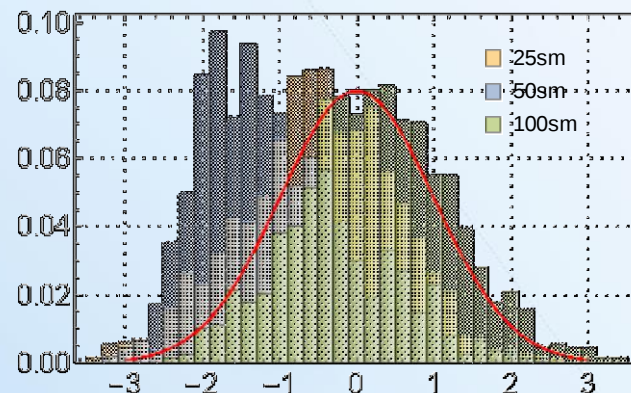


Структурные функции

Характерный вид функций распределения пульсационных составляющих температуры имеет вид: $Y = \text{Exp}[Ax^n]$



а - 10:02 19.07.2011



д - 19:56 23.07.2010

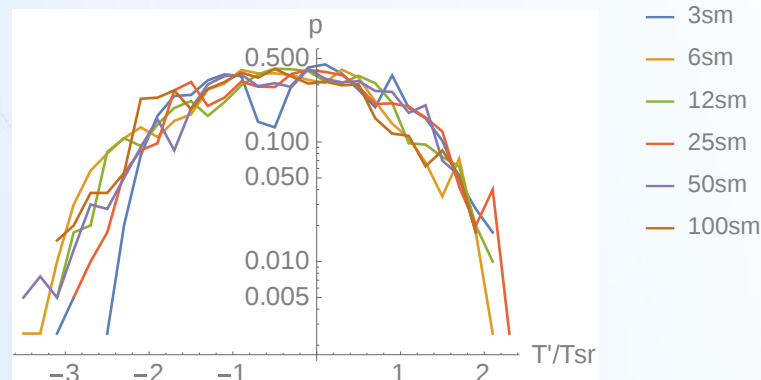
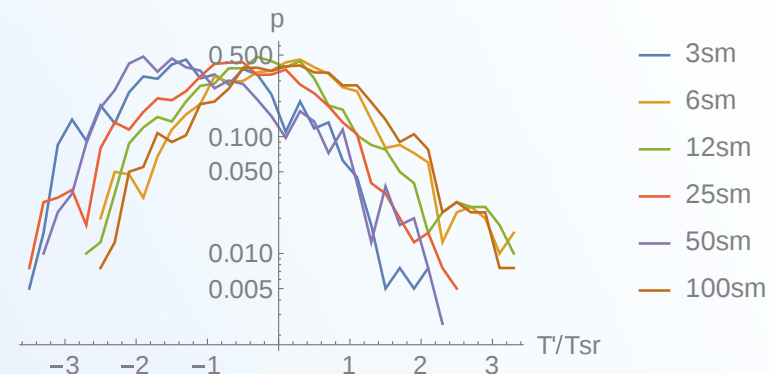
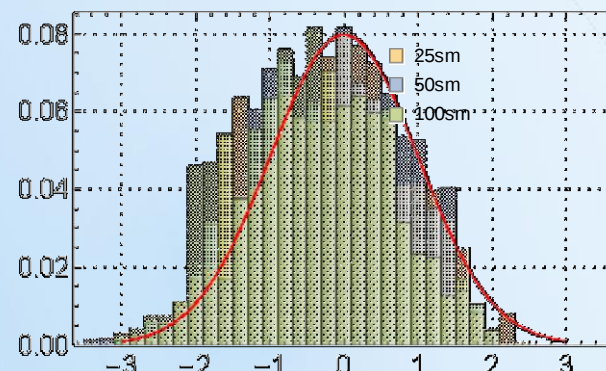
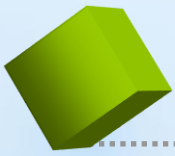


Рисунок 19. Распределения разности пульсационных значений температуры в разное время, указывающие на симметричность и разнонаправленность рампов в разное время (dt=0.5, 120 с)



Заключение

Выбраны три эпизода с учетом ориентации дюн и солнечной тени измерений пульсационных составляющих температуры условиях жаркой погоды на аридных территориях с использованием проволочных датчиков, распределенных по высоте, за 2010, 2011 гг и 2022 г. (фиксация данных **с частотой 100 Гц и 1000 Гц соответственно**). Тепловые структуры определяются по временным разверткам на би уровнях для пульсационных составляющих температуры. Для относительных значений пульсационных составляющих отмечается нитевидная периодическая структура. Для усредненных значений стандартного отклонения, асимметрии и эксцесса для всех дневных измерений можно особо отметить временные интервалы: 10:30-12:30 и 15:00-16:30. На результаты измерений влияет высота установления датчика, время суток, наличие световой тени.

На меньших частотах относительно инерционного интервала «**-5/3**» отмечаются различные наклоны со степенями, близкими к «**-1**», а также «**-2/3**», «**-1/3**».

Степень «**-5/3**» говорит о турбулентном движении каскада вихрей у поверхности, вызванных естественным рельефом местности.

Наблюдаемые в спектральных функциях степени «**-1**» характерны для термически стратифицированной среды с неактивным перемешиванием, что связано со значительными градиентами температур вблизи разогретой поверхности.

При условии, что пульсации вертикальной составляющей турбулентной энергии зависят от величины теплового потока, и интенсивны процессы диссипации и выравнивание температур, получаем степень «**-4/3**».

Устойчивые колебания значений температуры, определяемые величиной температуры и приповерхностным градиентом температуры, дают степень «**-1/3**».

В результате анализа структурных функций выявлены наклоны «**2/3**».

1. Frisch A. S., Businger J. A. Boundary-Layer Meteorology. 1973, Vol. 3, 3, pp. 301-328.
2. Koprov B. M. et al. Boundary-layer meteorology. 1998, Vol. 88, 3, pp. 399-423.
3. Chkhetiani, O. G. et al. Atm. Chemistry and Physics, 2012, Vol. 12(11), P. 5147–5162.
4. Малиновская Е. А. и др. Доклады РАН. Науки о Земле, 2023, 509 (2), pp. 109–117.
5. Медведев А.А., Кудерина Т.М., Чхетиани О.Г., Кудиков А.В., Пинигин Г.В. Анализ внутрисуточной динамики температуры подстилающей поверхности сухостепных ландшафтов на основе данных сверхвысокого разрешения [в печати].
6. Гисина Ф.А. О влиянии градиентов средней скорости и температуры на спектральные характеристики турбулентности. *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1966, Vol. 2, 8, p. 804.
7. Гисина Ф. А. Расчет основных спектральных характеристик турбулентности в термически стратифицированной атмосфере. *Trudy-Leningradskiiĭ gidrometeorologicheskiiĭ institut*. 1968, Vol. 34, p. 49.
8. Batchelor G. K. Small-scale variation of convected quantities like temperature in turbulent fluid Part 1. General discussion and the case of small conductivity //Journal of fluid mechanics. – 1959. – Т. 5. – №. 1. – С. 113-133.
9. Martens C.P. Spectrum of turbulence with temperature gradient (in the atmosphere). *journal of Physics A: Mathematical and Genera*. 1976, Vol. 9, 10, p. 1751.
10. Чхетиани О. Г., Вазаева Н. В. Об алгебраических возмущениях в атмосферном пограничном слое //Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 55. – №. 5. – С. 62-75.
11. Яглом А.М. *Структура турбулентности в неустойчиво стратифицированном приземном пограничном слое* // Отчет. М. : s.n., 1987.
12. Chen W. et al. Coherent eddies and temperature structure functions for three contrasting surfaces. Part I: Ramp model with finite microfront time //Boundary-Layer Meteorology. – 1997. – Т. 84. – С. 99-124.
13. Hommema S. E., Adrian R. J. Packet structure of surface eddies in the atmospheric boundary layer //Boundary-Layer Meteorology. – 2003. – Т. 106. – С. 147-170.
14. Lotfy E. R., Harun Z. Effect of atmospheric boundary layer stability on the inclination angle of turbulence coherent structures //Environmental Fluid Mechanics. – 2018. – Т. 18. – С. 637-659.
15. Phong-Anant D. et al. Features of the organized motion in the atmospheric surface layer //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1980. – Т. 85. – №. C1. – С. 424-432.

- 1. Snyder R. L., Spano D., Pawu K. T. Surface renewal analysis for sensible and latent heat flux density // Boundary-Layer Meteorology, 1996. T. 77. C. 249-266. <https://doi.org/10.1007/BF00123527>
- 2 Taylor R. J. Thermal structures in the lowest layers of the atmosphere // Australian Journal of Physics, 1958. Vol. 11(2). P. 168-176. <https://doi.org/10.1071/PH580168>
- 3. Koprov B. M. et al. Statistics of air temperature spatial variability in the atmospheric surface layer // Boundary-layer meteorology. 1998; 88(3). 399–423. doi: 10.1023/A:1001517403557.
- <https://doi.org/10.1029/JC085iC01p00424>
- 4. Phong-Anant D. et al. Features of the organized motion in the atmospheric surface layer // Journal of Geophysical Research: Oceans, 1980. T. 85. №. C1. P. 424-432. <https://doi.org/10.1029/JC085iC01p00424>
- 5. Malinovskaya E.A., Chkhetiani O.G., Azizyan G.V. On the Structure of Temperature Pulsations near the Surface under Convective Conditions // Doklady Earth Sciences, 2024, Vol. 516, Part 1, pp. 888–895. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24601159>
- 1. Snyder R. L., Spano D., Pawu K. T. Surface renewal analysis for sensible and latent heat flux density // Boundary-Layer Meteorology, 1996. T. 77. C. 249-266. <https://doi.org/10.1007/BF00123527>
- 2 Taylor R. J. Thermal structures in the lowest layers of the atmosphere // Australian Journal of Physics, 1958. Vol. 11(2). P. 168-176. <https://doi.org/10.1071/PH580168>
- 3. Koprov B. M. et al. Statistics of air temperature spatial variability in the atmospheric surface layer // Boundary-layer meteorology. 1998; 88(3). 399–423. doi: 10.1023/A:1001517403557.
- <https://doi.org/10.1029/JC085iC01p00424>
- 4. Phong-Anant D. et al. Features of the organized motion in the atmospheric surface layer // Journal of Geophysical Research: Oceans, 1980. T. 85. №. C1. P. 424-432. <https://doi.org/10.1029/JC085iC01p00424>
- 5. Malinovskaya E.A., Chkhetiani O.G., Azizyan G.V. On the Structure of Temperature Pulsations near the Surface under Convective Conditions // Doklady Earth Sciences, 2024, Vol. 516, Part 1, pp. 888–895. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24601159>



Статистическая обработка

Тепловой поток $F = \rho c_p T' u'_z$

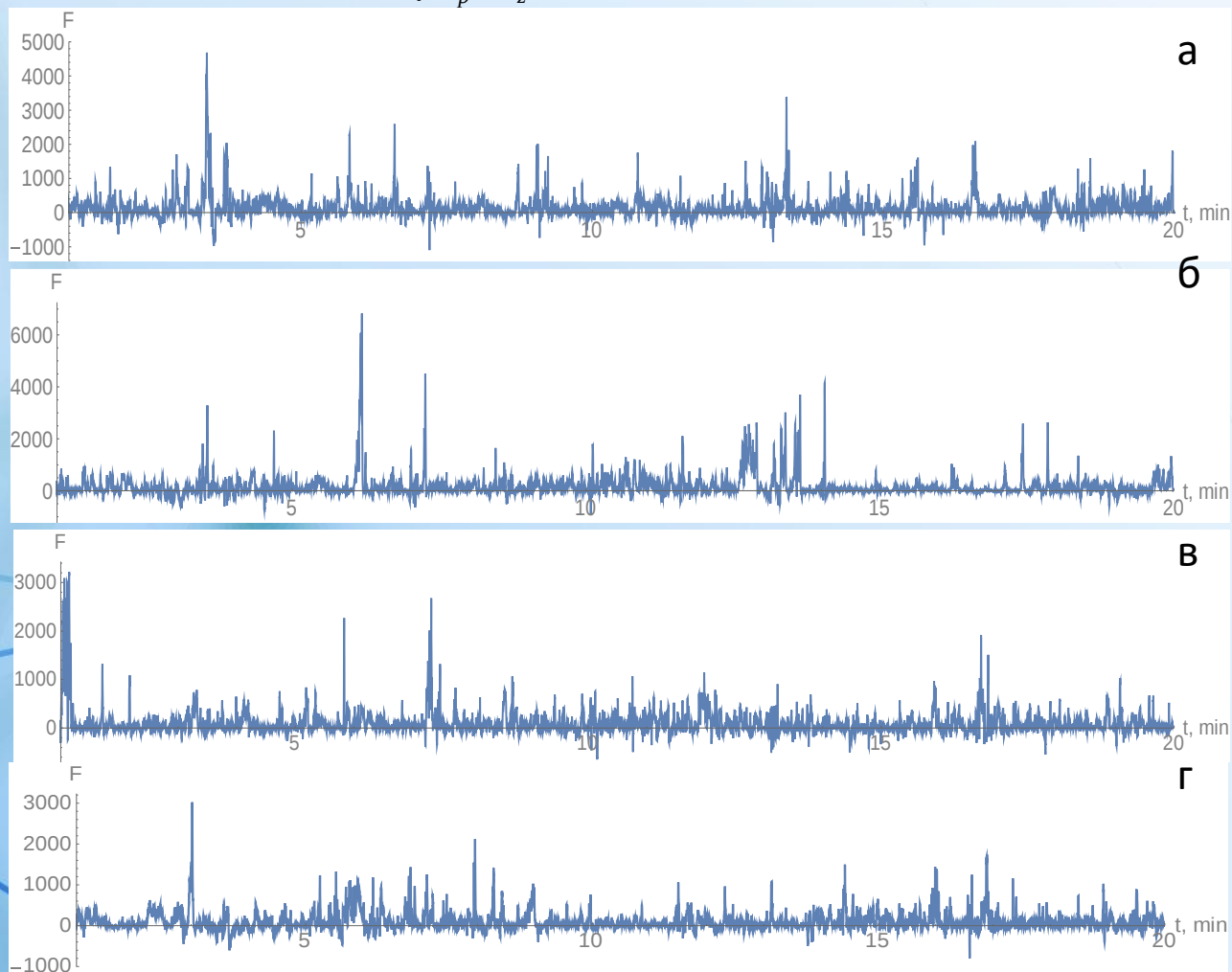


Рис.8. Изменение теплового потока в течение 20 минут в три момента времени, а-10:00, б-12:00, в-14:00, г-16:00

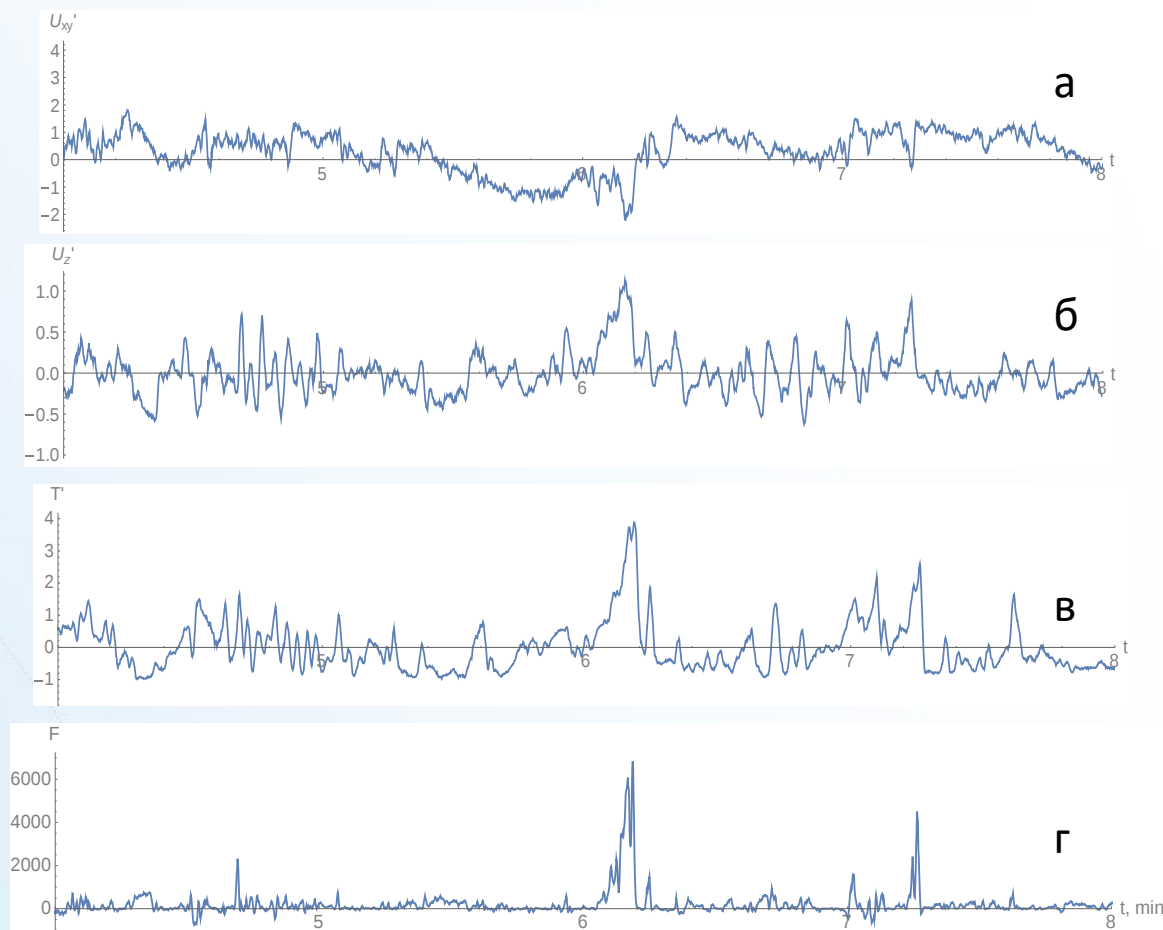


Рис.9. Изменение пульсационных составляющих горизонтальной (а) и вертикальной (б) составляющих скоростей ветра и температуры (в) в момент всплеска величины теплового потока (г) в выделенный момент времени