



# Об универсальных статистических закономерностях шквальных ветров



Вазаева Н.В., Чхетиани О.Г., Голицын Г.С.,

Данные измерений получены  
Кулижниковой Л.К., Мацкевич М.К.



19-21 ноября 2024

Москва, Россия

# Цели и актуальность

- Опасность **шквалов** и сложность их прогнозирования связаны с **внезапностью их формирования**.
- **Шквалы** могут нести большую **энергию разрушения** и зачастую **вызывают значительные конструктивные разрушения зданий и сооружений**, в том числе, повреждения ЛЭП и линий связи, сбои в работе точного оборудования и транспорта.
- **Диагностика основных характеристик шквалов и примерная оценка масштабов разрушения** становится возможной при использовании большого массива данных по направлению и скорости ветра с достаточной степенью статистической надежности (**например**, данные с ВММ Института экспериментальной метеорологии ФГБУ НПО «Тайфун»)

# Обнинская ВММ («Тайфун»).

- Источник «предварительных» данных по характеристикам шквалов за 2014-2023 гг. это **большой массив непрерывных данных наблюдений из ВММ.**
- **25, 73, 121, 217 & 301 м**
- **1 Гц** – скользящее среднее **10 мин**
- В дополнение к **лопастным ветровым датчикам, акустическим анемометрам** на части высот был смонтирован **метеорологический комплекс МК-15, разработанный ФГБУ НПО «Тайфун» и акустический анемометр “Model 81000V”** фирмы **R. M. YOUNG COMPANY, USA,** измеряющий три компоненты скорости.
- *Такие экспериментальные данные по ряду долгосрочных измерений на ВММ делает возможным, после первичной обработки данных скорости, зафиксировать интенсивные шквалы, проходящие через измерительный полигон.*

# Обнинская ВММ («Тайфун»).

Измеряемые метеорологические параметры	Измерительный диапазон	Лимиты измерительных ошибок
Атмосферное давление с изменяемым началом отсчета в диапазоне от 600 до 917 гПа	150	$\pm 0,3$
Скорость ветра, m/s:		
- Горизонтальная компонента $V_r$	От 0,2 до 60	$\pm (0,2+0,03V_r)$
- Вертикальная компонента $V_v$	От -10 до +10	$\pm (0,2+0,03V_v)$
Направление ветра, градусы	От 0 до 360	$\pm 2$
Температура воздуха, °C	От -60 до +50	$\pm 0,2$
Относительная влажность воздуха, %	От 5 до 100	$\pm 3$ – в температурном диапазоне от 0 °C до +50 °C; $\pm 5$ – в температурном диапазоне от минус 40 °C до 0 °C; в температурном диапазоне от минус 40 °C измерения не проводятся

Метеорологические характеристики для МК-15



# Результаты измерений. Общий анализ и частные случаи

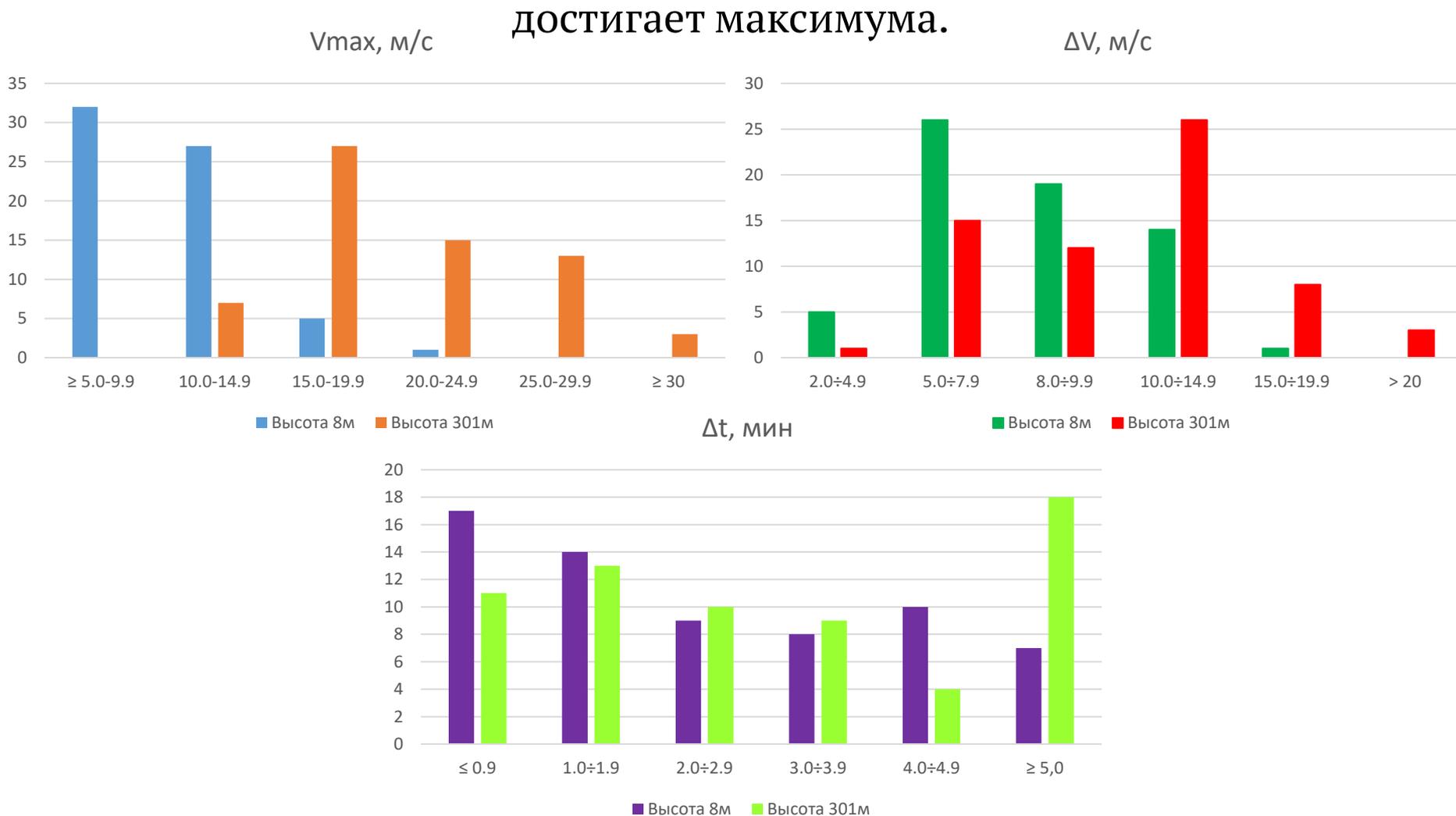
- В целом, в 2014-2023, в соответствии с измерениями на ВММ, зарегистрировано **64** (за 2024 еще 10) шквала и шквалистого усиления ветра

Характеристики шквалистого усиления ветра за 2014-2023.  
 $V_{max}$  – максимальная скорость ветра в течение шквала;  $\Delta V$  – изменение скорости в течение шквала;  $\Delta t$  – время, за которое скорость в шквале достигает максимума.

Градация $V_{max}$ , м/с	Высота, м		Градация $\Delta V$ , м/с	Высота, м		Градация $\Delta t$ , мин	Высота, м	
	8	301		8	301		8	301
$\geq 5.0-9.9$	32		2.0÷4.9	5	1	$\leq 0.9$	17	11
10.0-14.9	27	7	5.0÷7.9	26	15	1.0÷1.9	14	13
15.0-19.9	5	27	8.0÷9.9	19	12	2.0÷2.9	9	10
20.0-24.9	1	15	10.0÷14.9	14	26	3.0÷3.9	8	9
25.0-29.9		13	15.0÷19.9	1	8	4.0÷4.9	10	4
$\geq 30$		3	$> 20$		3	$\geq 5,0$	7	18

# Результаты измерений. Общий анализ и частные случаи

Характеристики шквалистого усиления ветра за 2014-2023.  $V_{max}$  – максимальная скорость ветра в течение шквала;  $\Delta V$  – изменение скорости в течение шквала;  $\Delta t$  – время, за которое скорость в шквале достигает максимума.



# Результаты измерений. Общий анализ и частные случаи

- Критерием выделения шквала было выбрано **резкое усиление скорости ветра** за короткое время. Все отобранные случаи были связаны с прохождением через высотную мачту кучево-дождевых облаков. Облака были или **внутримассового** происхождения, или **связанные с холодным фронтом**. В последнем случае скорость ветра во время шквала была выше. **Отдельно выделена группа с резкими шквалами, со скоростью, увеличивающейся от небольшой величины** – имеющими большой негативный потенциал воздействия на результаты хозяйственной деятельности человека, транспортную и сельскохозяйственную отрасли. Из-за сильной затененности уровня 8 м близко расположенным лесом и городской застройкой скорости ветра на этой высоте не достигали значения шквалов.

# На самом деле, 3 группы...

- По результатам анализа шквалы были поделены на 3 группы:
- - **Группа 1.** Шквалы при **прохождении** нескольких **кучево-дождевых** облаков днем, внутримассовых или перед холодным фронтом. Подгруппы:
  - 1.1. Максимальная скорость ветра при шквалах меньше 20 м/с на общем фоне слабого или умеренного среднего ветра
  - 1.2. Максимальная скорость ветра во время одного или нескольких шквалов больше или равна 20 м/с. Средняя скорость ветра умеренная, не превышающая 10-12 м/с
  - 1.3. На общем фоне сильного ветра, превышающего 10-12 м/с, несколько усилений ветра днем при прохождении кучево-дождевых облаков.
- - **Группа 2.** Шквал **на холодном фронте**. (Внутри первых двух групп случаи шквалов подразделялись по скорости ветра на высоте 301 м: меньше или больше 20 м/с.) Подгруппы:
  - 2.1. Максимальная скорость ветра во время шквала меньше 20 м/с на высоте 301 м
  - 2.2. Максимальная скорость ветра во время шквала больше или равна 20 м/с на высоте 301 м
- - **Группа 3.** Резкий шквал, когда скорость увеличивается от небольшой величины.

# Солитонная теория шквальных бурь [Арсеньев, 2010]

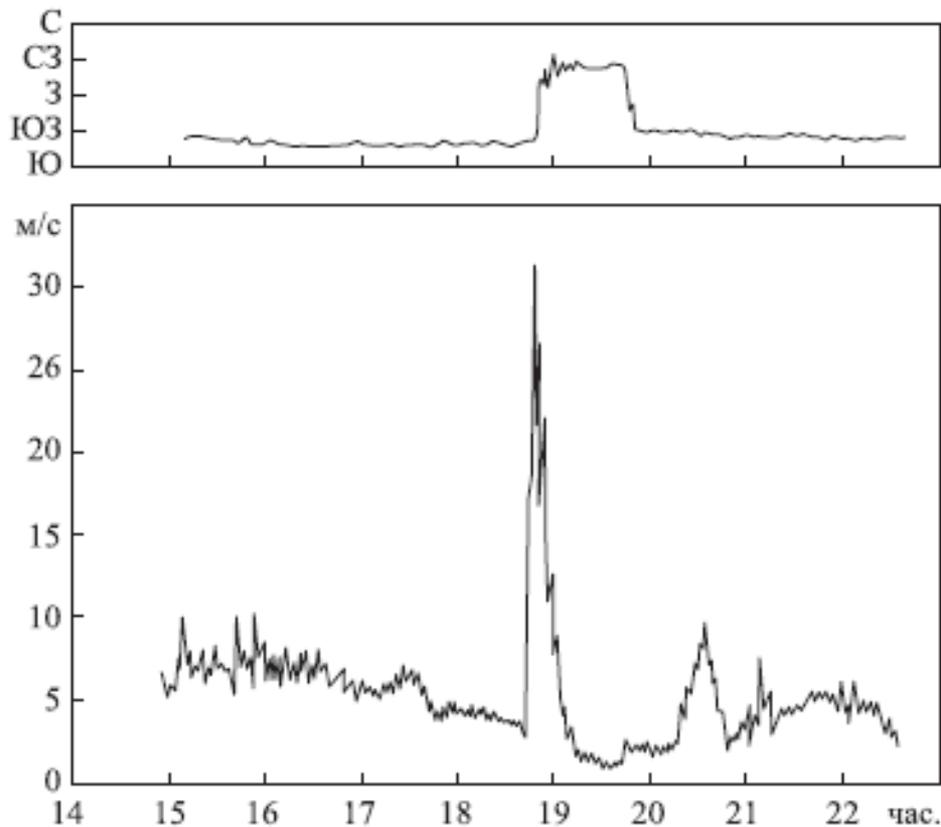


Рис. 1. Изменение направления (вверху) и скорости (внизу) ветра при прохождении шквальной бури

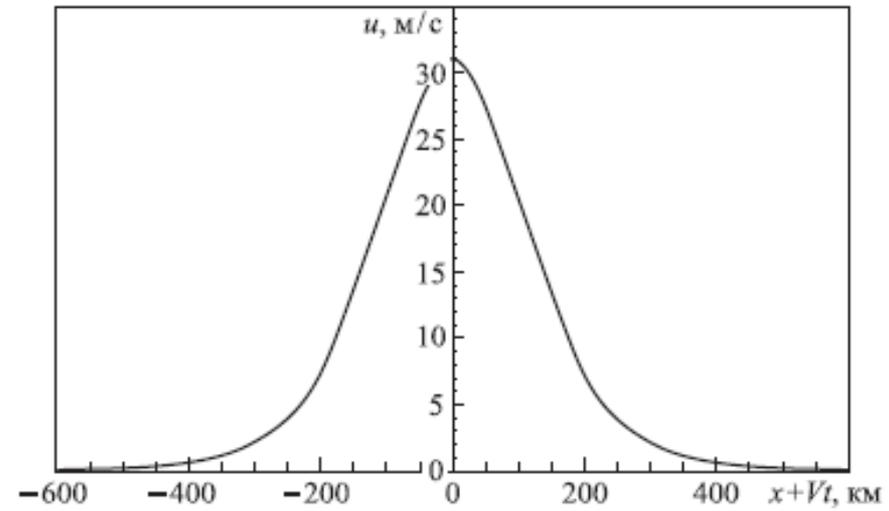
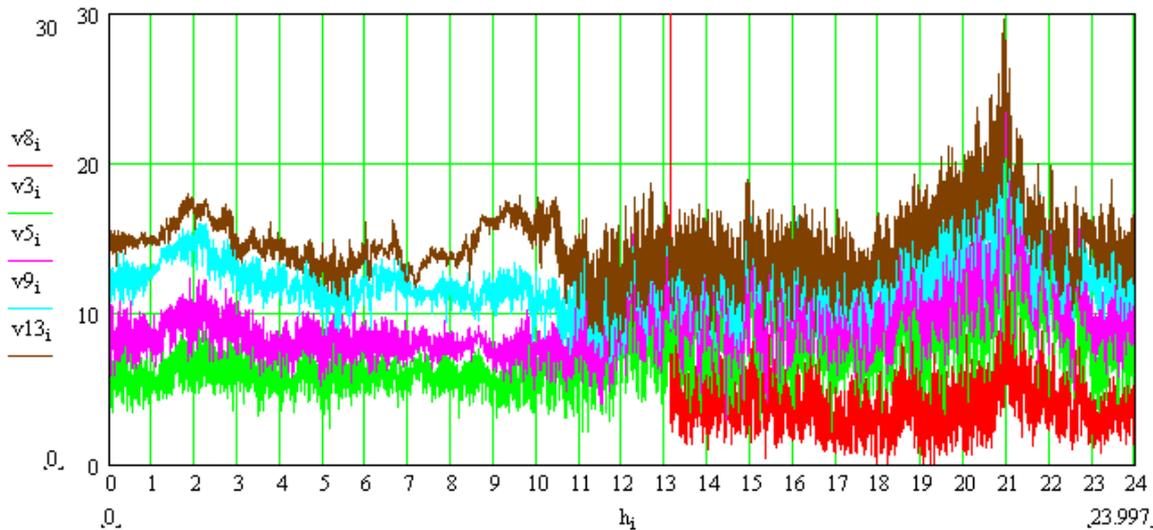


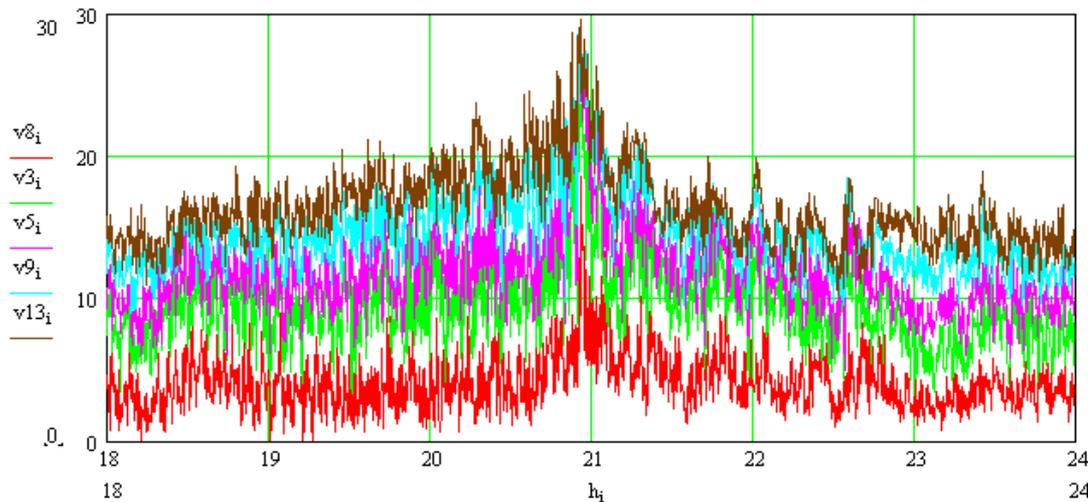
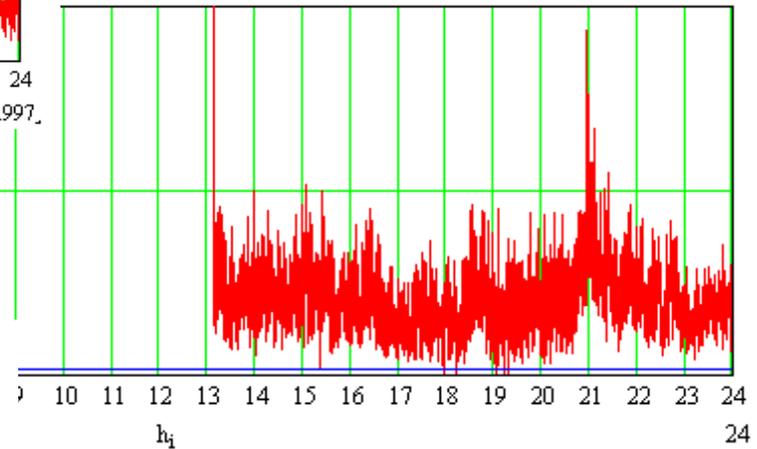
Рис. 4. Расчет изменения скорости ветра у поверхности Земли при прохождении шквальной бури. Максимальная скорость равна 31 м/с

не охватывает все наши **Частные случаи**

# Частный случай 15.03.2014

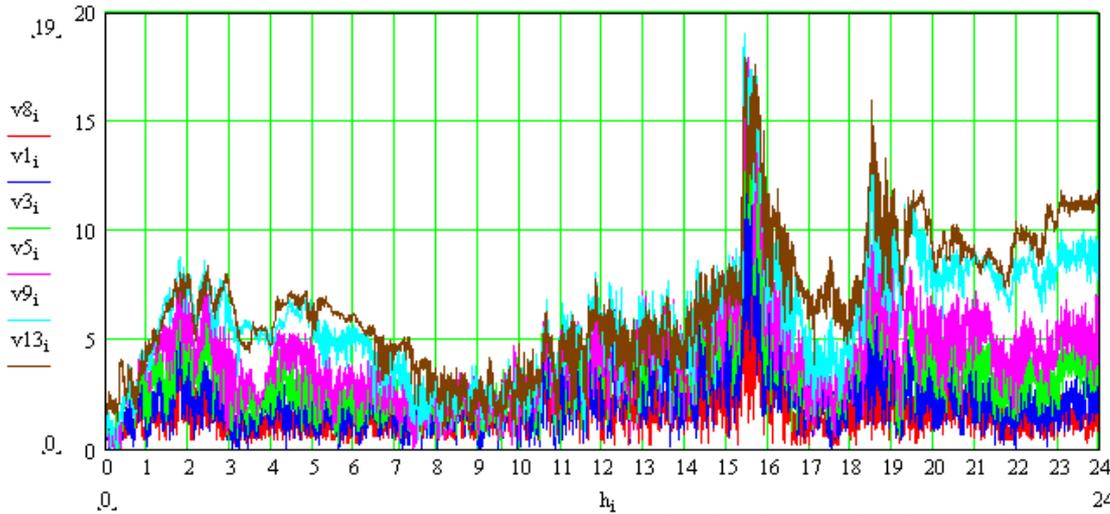


Скорость ветра (м/с) на  
пяти высотах.  
По оси X – час суток.

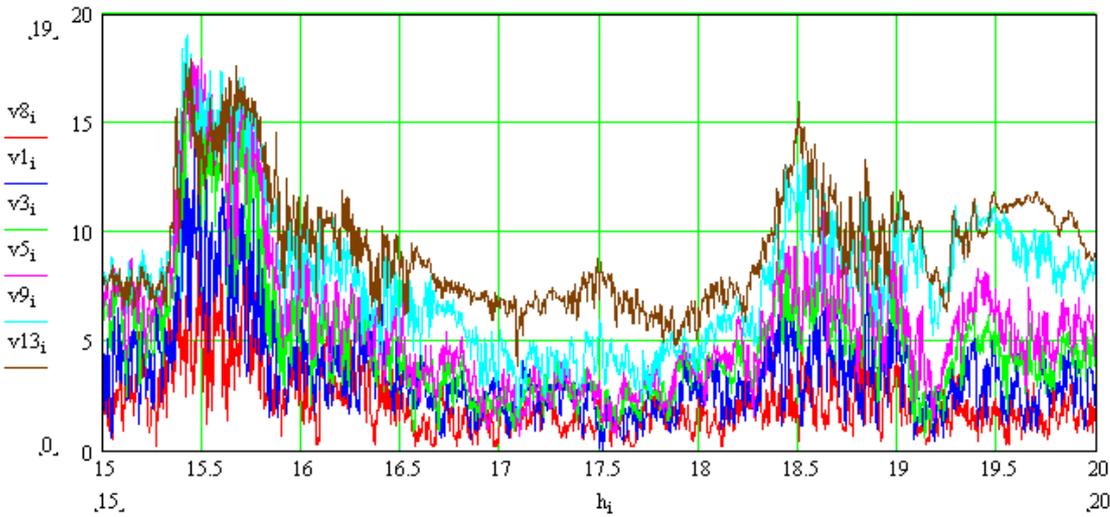
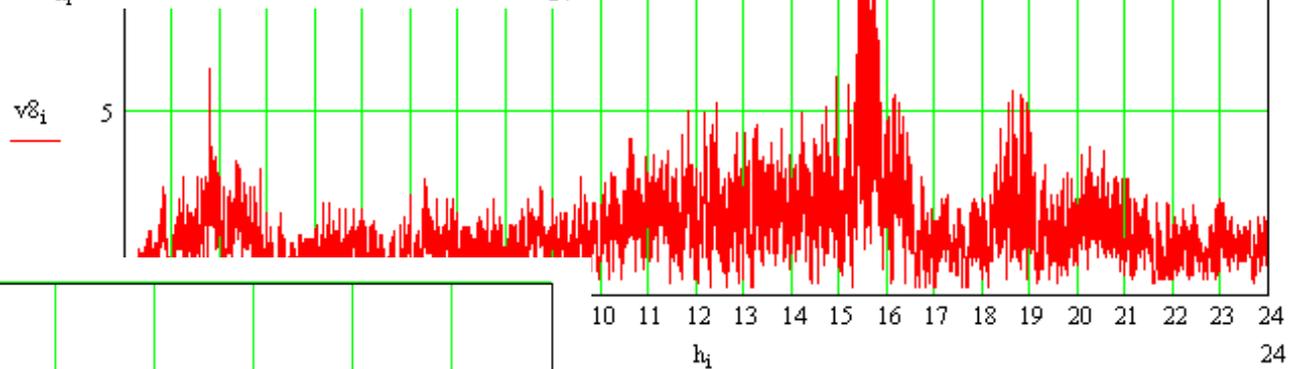


V8 скорость ветра на высоте 8 м;  
V3 скорость ветра на высоте 73 м;  
V5 скорость ветра на высоте 121 м;  
V9 скорость ветра на высоте 217 м;  
V13 скорость ветра на высоте 301 м.

# Частный случай 10.07.2015

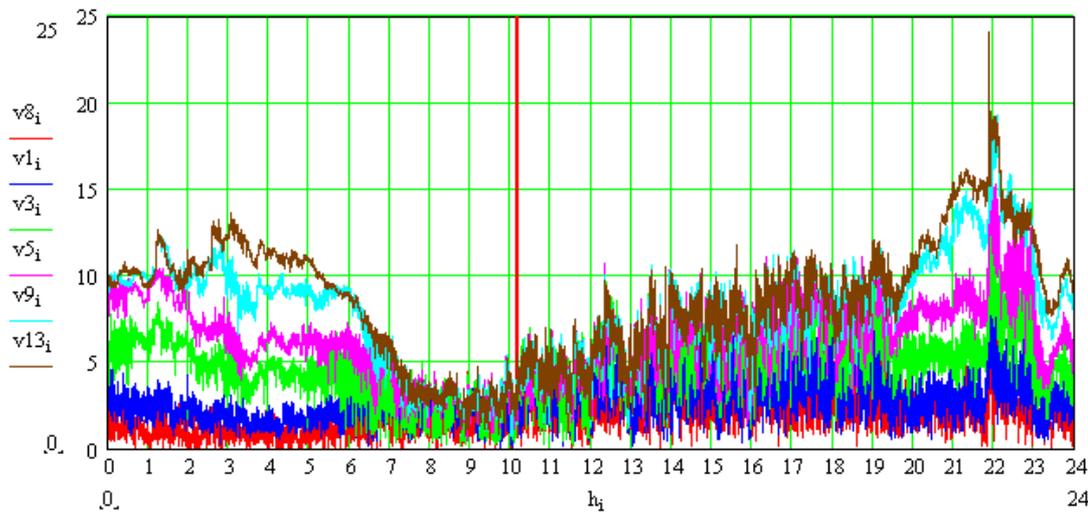


Скорость ветра (м/с) на  
пяти высотах.  
По оси X – час суток.

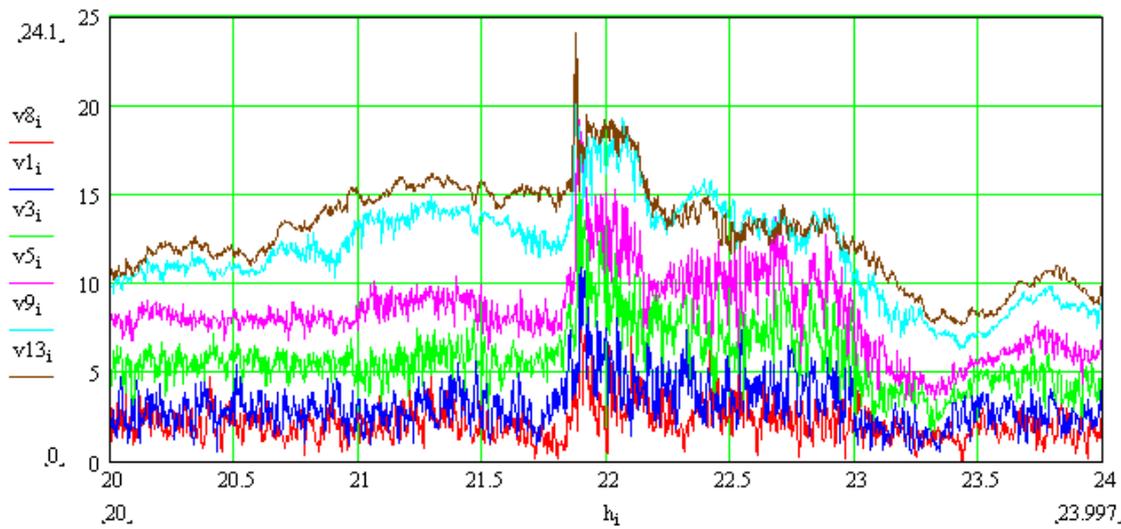
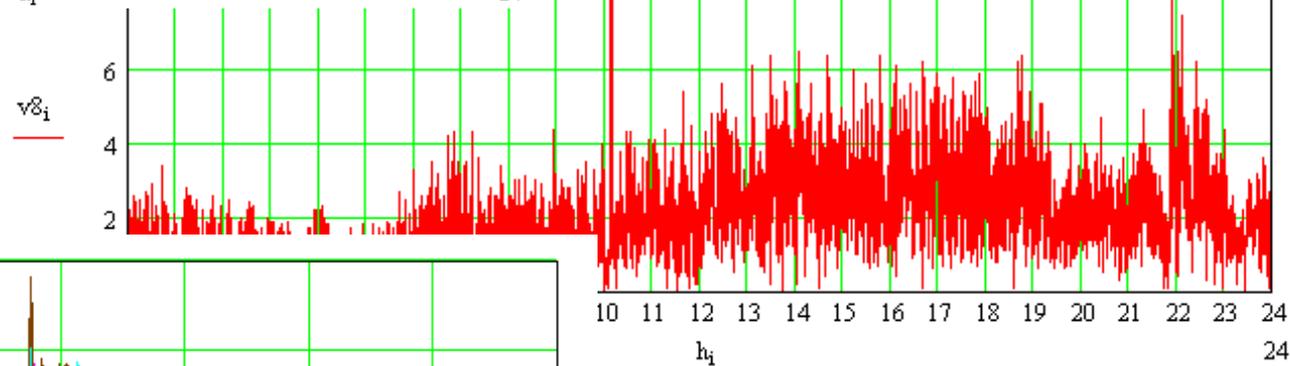


V8 скорость ветра на высоте 8 м;  
V3 скорость ветра на высоте 73 м;  
V5 скорость ветра на высоте 121 м;  
V9 скорость ветра на высоте 217 м;  
V13 скорость ветра на высоте 301 м.

# Частный случай 20.06.2017

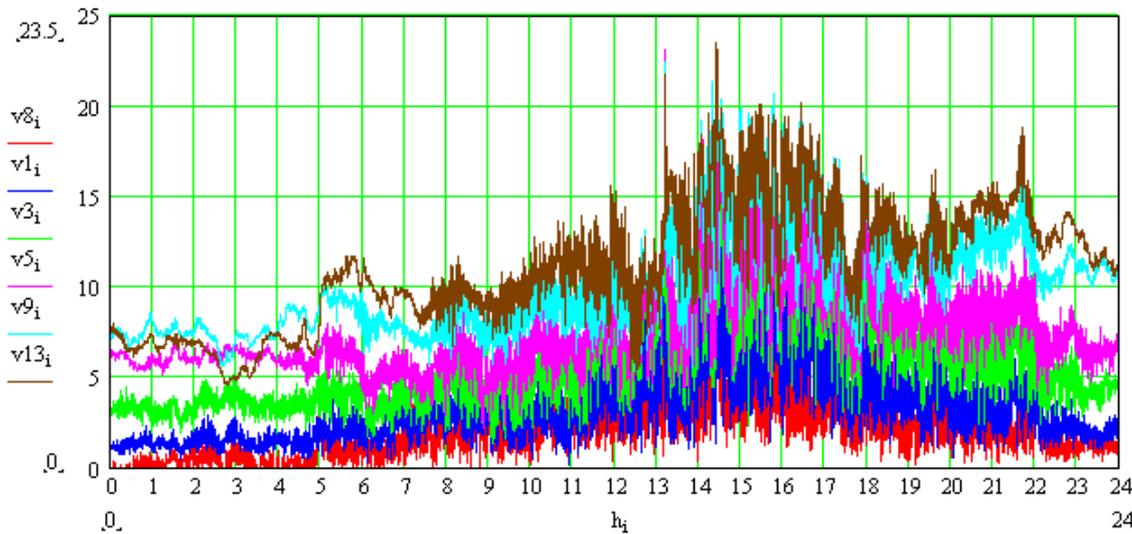


Скорость ветра (м/с) на  
пяти высотах.  
По оси X – час суток.

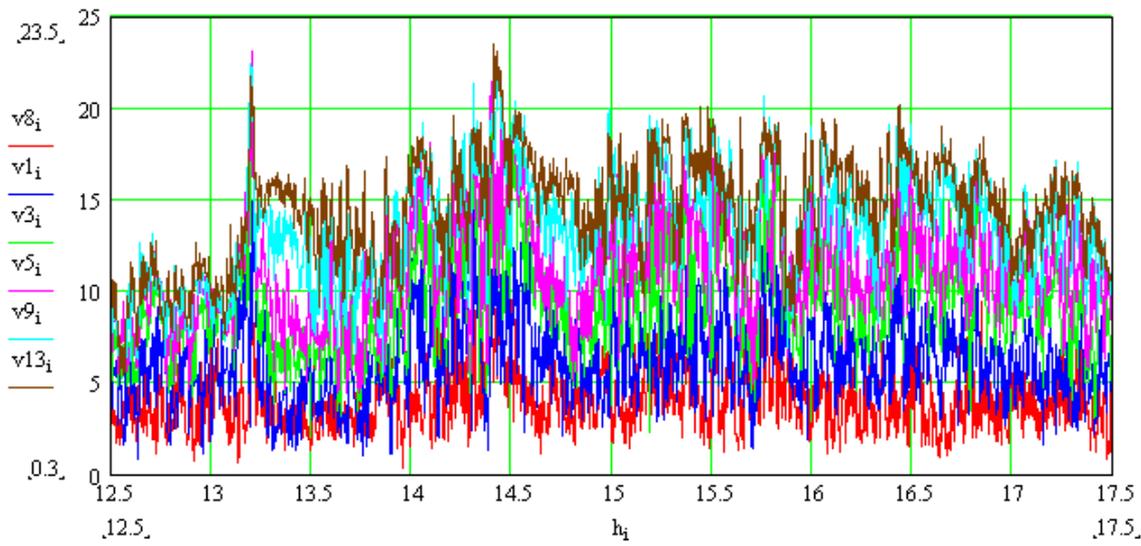
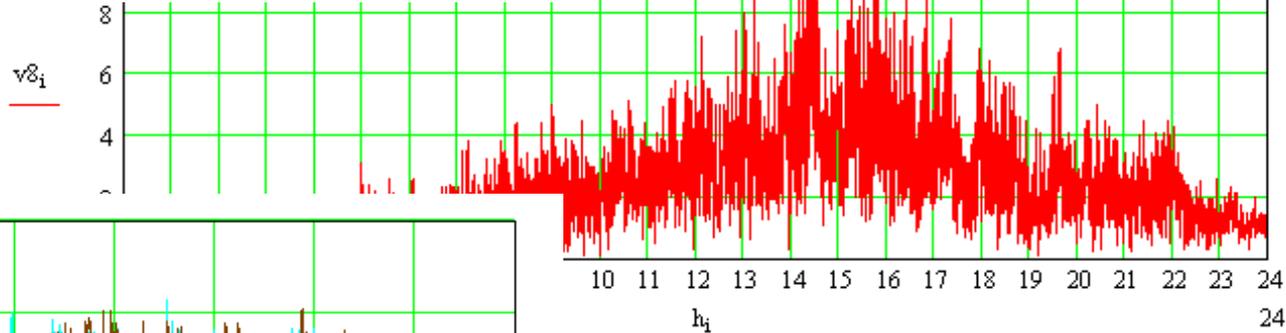


V8 скорость ветра на высоте 8 м;  
V3 скорость ветра на высоте 73 м;  
V5 скорость ветра на высоте 121 м;  
V9 скорость ветра на высоте 217 м;  
V13 скорость ветра на высоте 301 м.

# Частный случай 26.04.2018

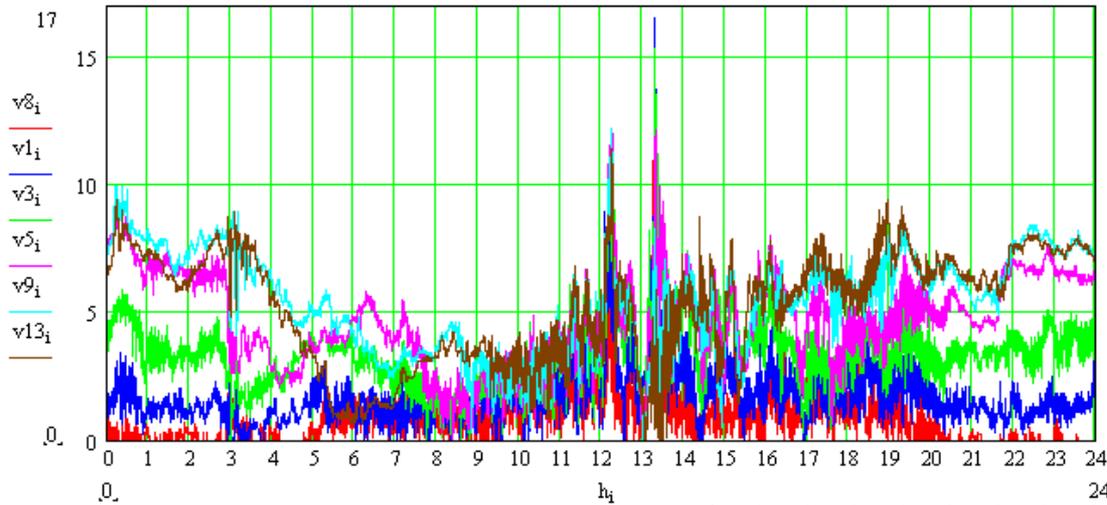


Скорость ветра (м/с) на  
пяти высотах.  
По оси X – час суток.

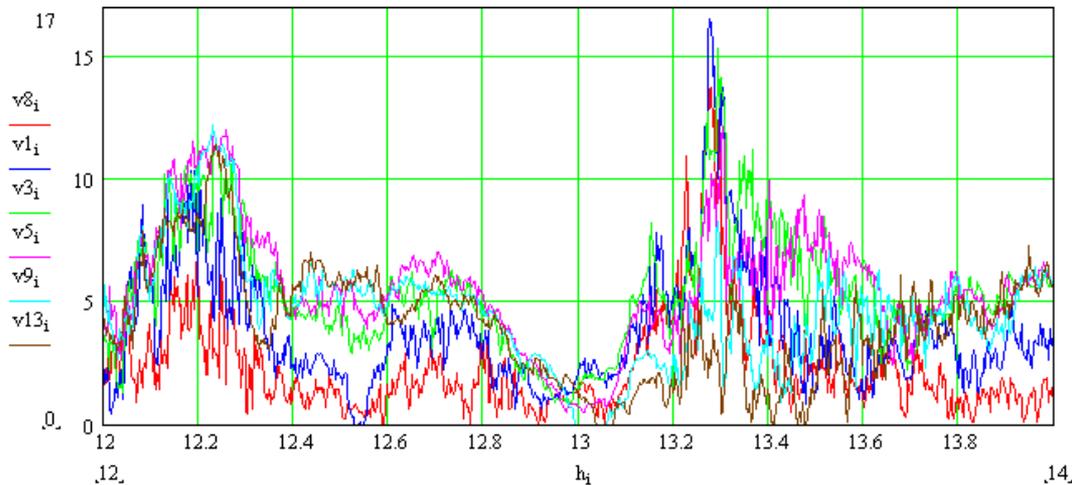
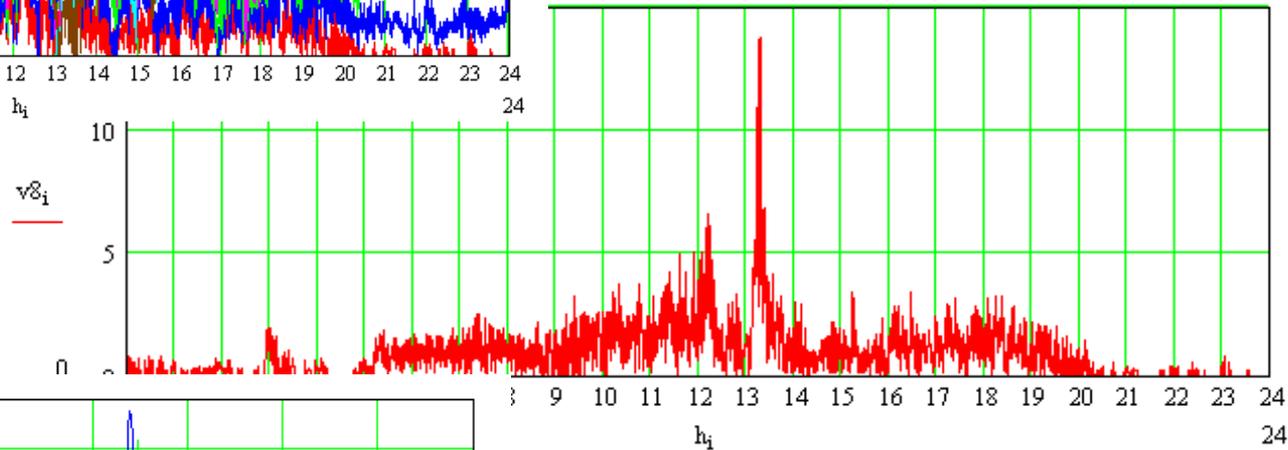


V8 скорость ветра на высоте 8 м;  
V3 скорость ветра на высоте 73 м;  
V5 скорость ветра на высоте 121 м;  
V9 скорость ветра на высоте 217 м;  
V13 скорость ветра на высоте 301 м.

# Частный случай 04.08.2018

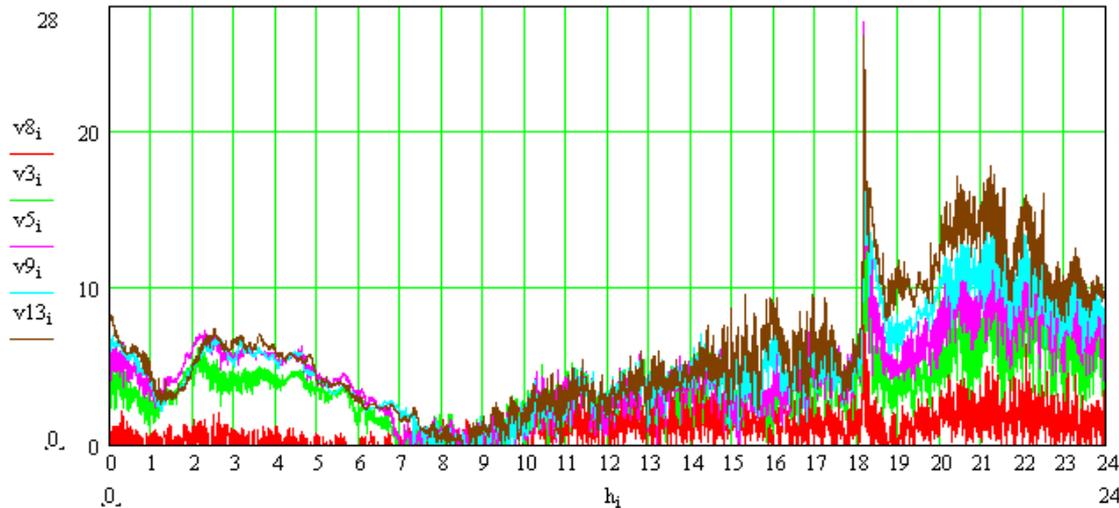


Скорость ветра (м/с) на  
пяти высотах.  
По оси X – час суток.

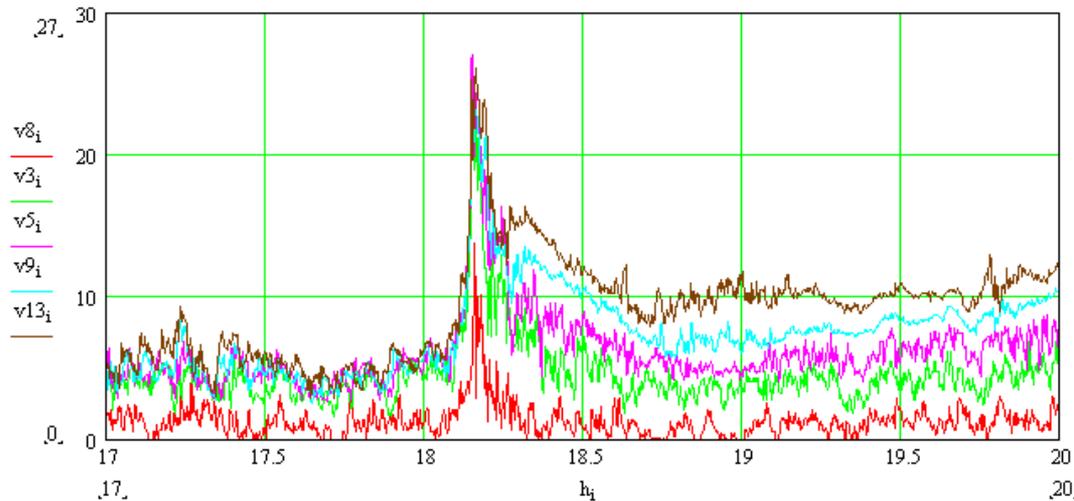
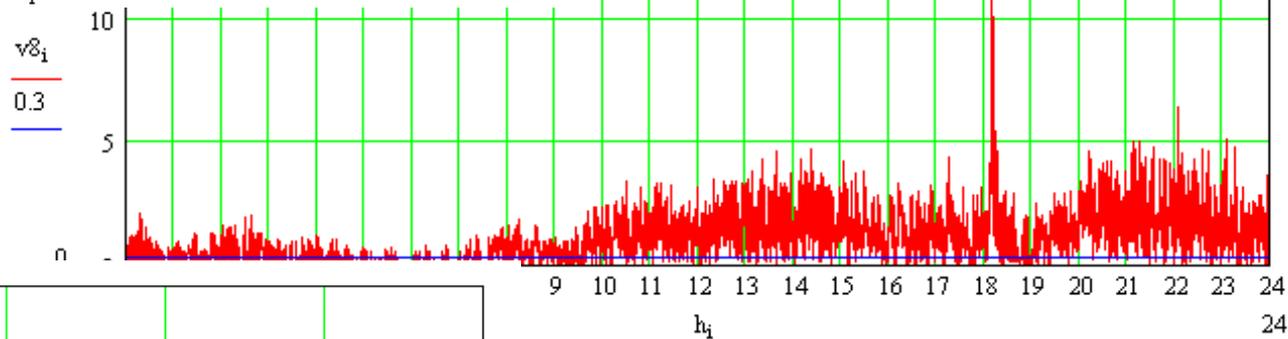


V8 скорость ветра на высоте 8 м;  
V3 скорость ветра на высоте 73 м;  
V5 скорость ветра на высоте 121 м;  
V9 скорость ветра на высоте 217 м;  
V13 скорость ветра на высоте 301 м.

# Частный случай 12.05.2021



Скорость ветра (м/с) на  
пяти высотах.  
По оси X – час суток.



V8 скорость ветра на высоте 8 м;  
V3 скорость ветра на высоте 73 м;  
V5 скорость ветра на высоте 121 м;  
V9 скорость ветра на высоте 217 м;  
V13 скорость ветра на высоте 301 м.

# Статистические распределения

- Получены первые результаты по статистическим распределениям основных диагностических характеристик - скорости, энергии и мощности ветра, - которые могут **быть связаны с причинами образования шквалов и сопутствующих им когерентных структур.**

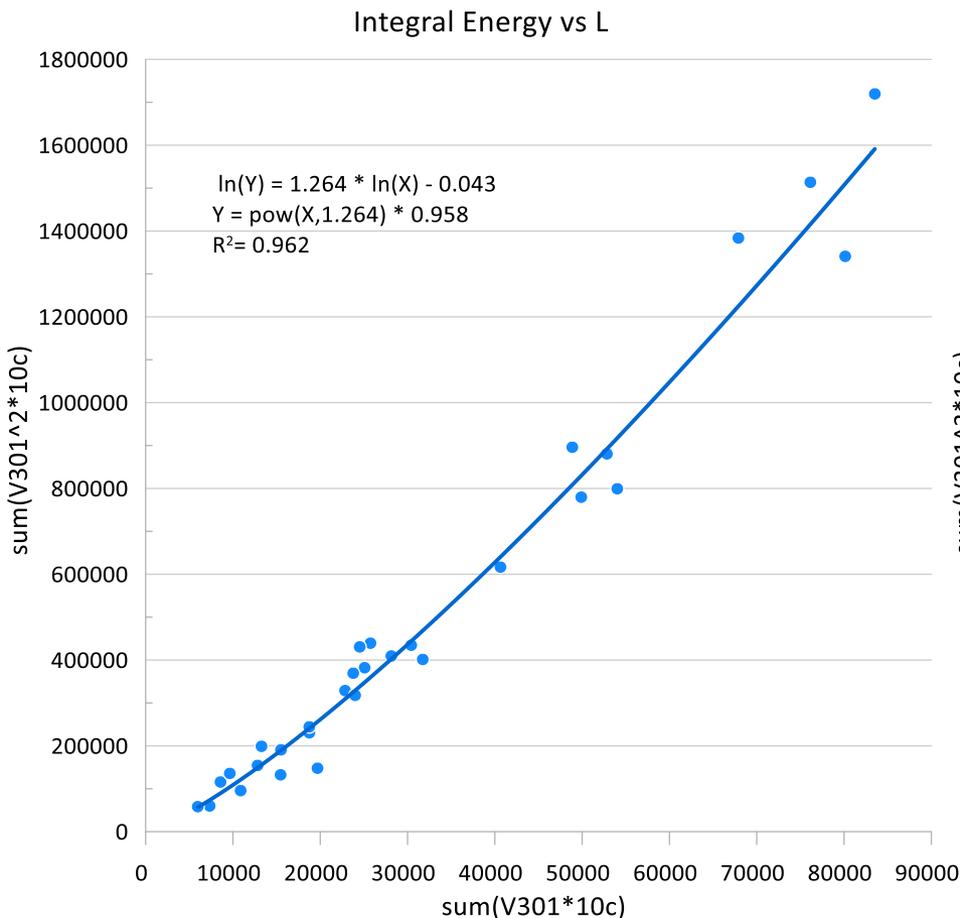
# Статистические распределения

- С использованием описанных выше данных был **проведен статистический анализ**, оценены **размеры и энергия шквалов**.
- Для всех случаев были рассчитаны: <sup>(1)</sup>время шквала, <sup>(2)</sup>время усиления ветра, <sup>(3)</sup>масштаб шквала, <sup>(4)</sup>максимальная скорость, <sup>(5)</sup>средняя скорость, <sup>(6)</sup>коэффициенты масштаба, <sup>(7)</sup>энергия, <sup>(8)</sup>мощность и <sup>(9)</sup>другие сопутствующие параметры.
- **Степени скорости**, в том числе **для получения энергии и мощности**, оценивались как *интегральные значения, посчитанные с учетом шага уже усредненных за 10 сек. значений, методом трапеций.*

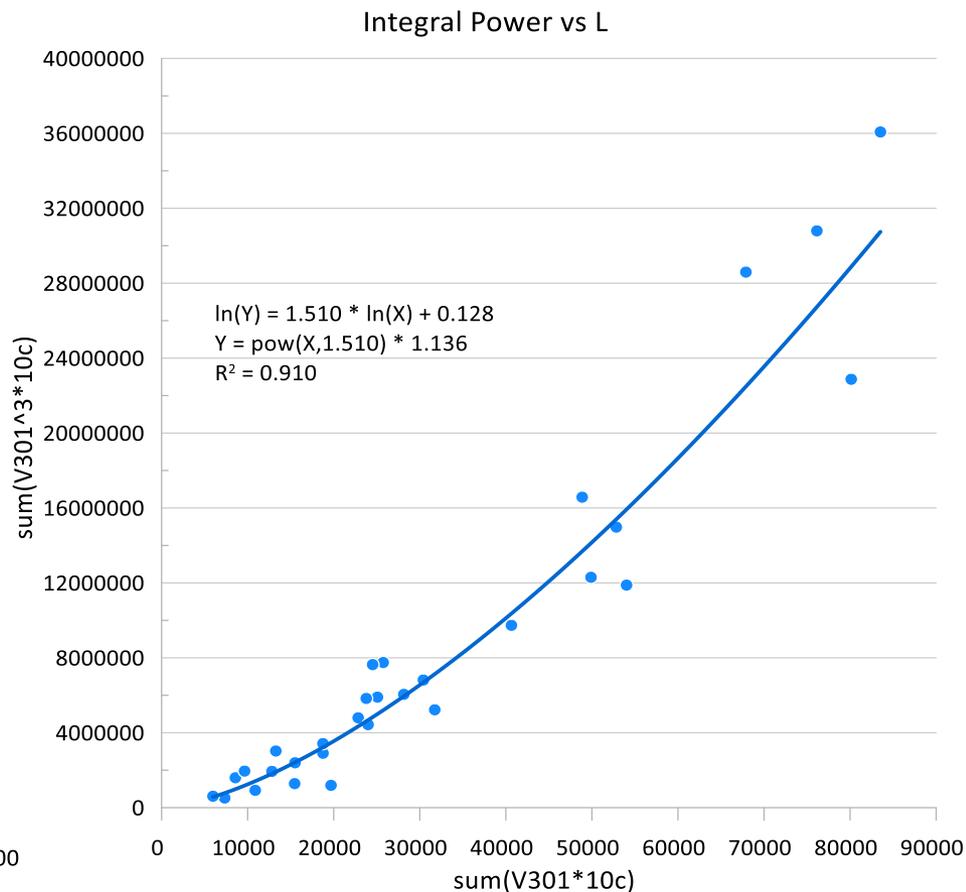
## Статистические распределения

- Наиболее интересные результаты показаны ниже, в которых значения скорости, максимальной и осредненной, энергии, мощности, масштаба для разных и никак не связанных между собой (!) шквалов, даже без учета деления на группы, ложатся на одну кривую с вероятностью примерно 95-98% (!!!).
  - Авторы предполагают здесь связь с турбулентностью и с субмезомасштабными когерентными структурами

# Кривые зависимости от масштаба шквала



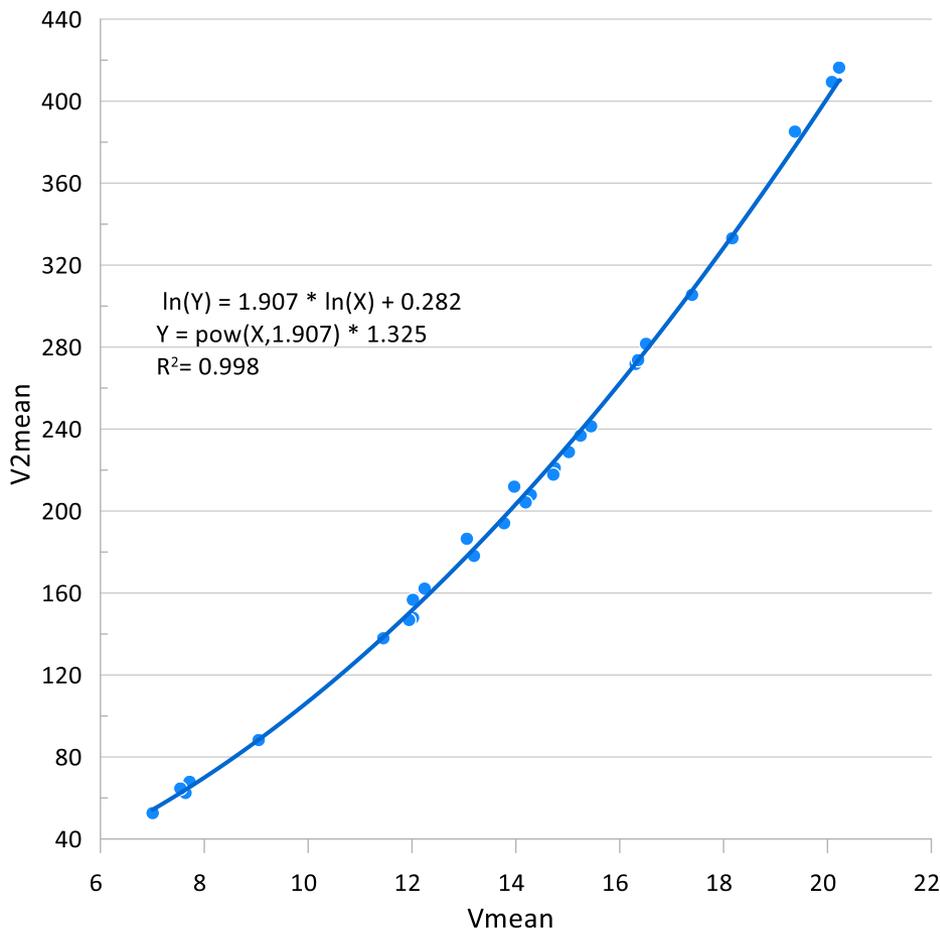
Зависимость квадрата скорости (энергии)  
от масштаба шквала



Зависимость куба скорости от масштаба  
шквала

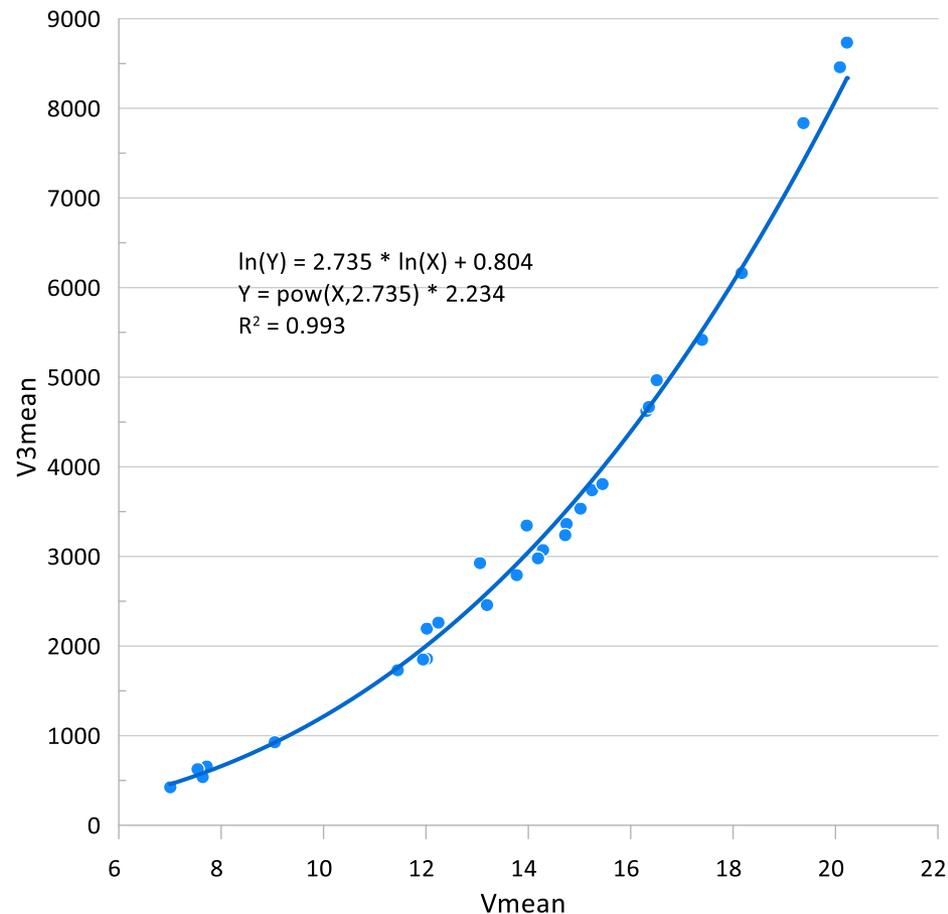
# Кривые зависимости от средней скорости на протяжении всего шквала

## Mean Energy vs Mean Velocity

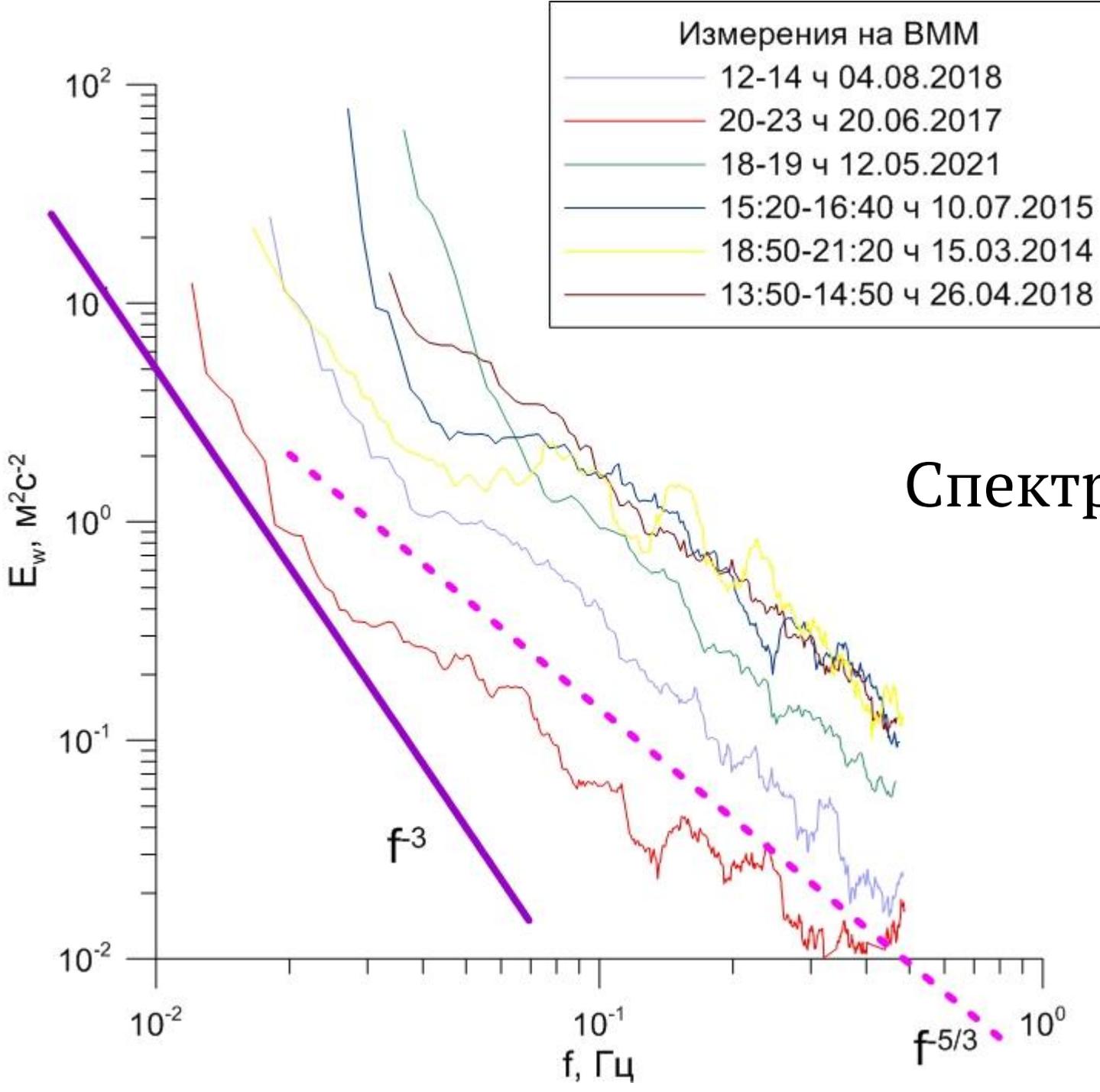


Зависимость средних значений квадрата скорости (энергии) от осредненной скорости на протяжении всего шквала

## Mean Power vs Mean Velocity



Зависимость средних значений куба скорости (мощности) от осредненной скорости на протяжении всего шквала



## Спектр энергии

# Спектры

- Экспериментальные спектры атмосферной турбулентности были получены в зональных струйных течениях в среде, устойчиво стратифицированной по плотности, но со значительными градиентами скорости ветра еще в 70е гг. прошлого века [по данным самолетных измерений: 1976 Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шметер С.М., Шур Г.Н. ].
- На особенности структуры турбулентного потока в термически стратифицированной среде указал А.М. Обухов. Экспериментальные данные указывают на то, что должен существовать какой-то механизм поглощения кинетической энергии турбулентности, присущий свободной атмосфере. Может быть связан с особенностями среды или с температурной стратификацией...
- В работе Шура показано, что кинетическая энергия турбулентных пульсаций перетекает в потенциальную до тех пор, пока стратификация устойчива. Объясняет потери части энергии турбулентных пульсаций в устойчиво стратифицированной атмосфере на работу против сил плавучести

# Спектры

[1976 Винниченко Н.К.]

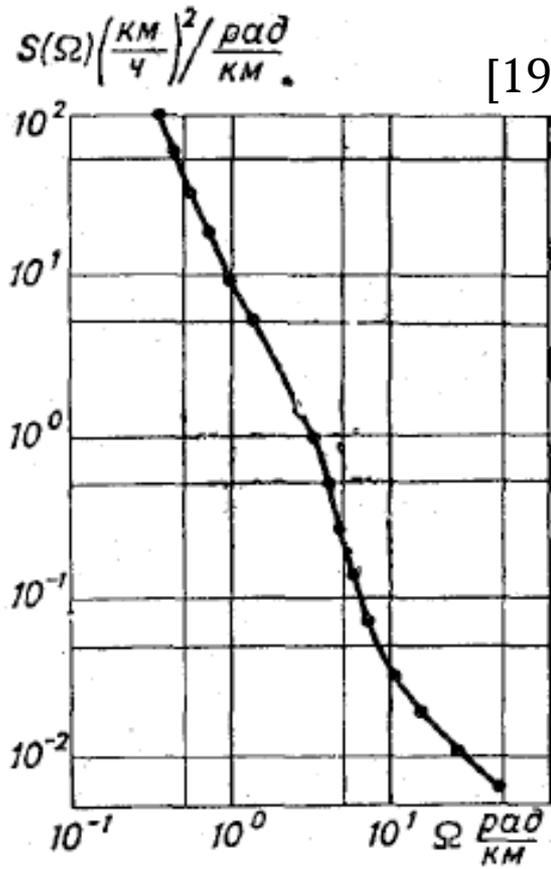


Рис. 4.3. Энергетический спектр пульсаций горизонтальной компоненты турбулентности в ясном небе в зоне струйного течения.

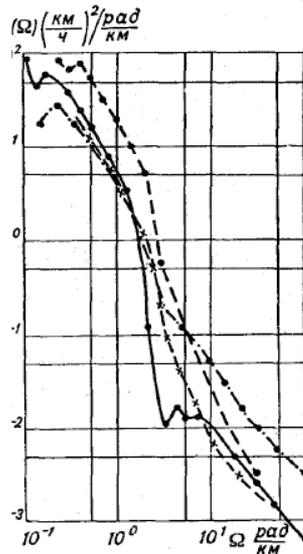


Рис. 4.4. Примеры энергетических спектров турбулентности в ясном небе (горизонтальная компонента).

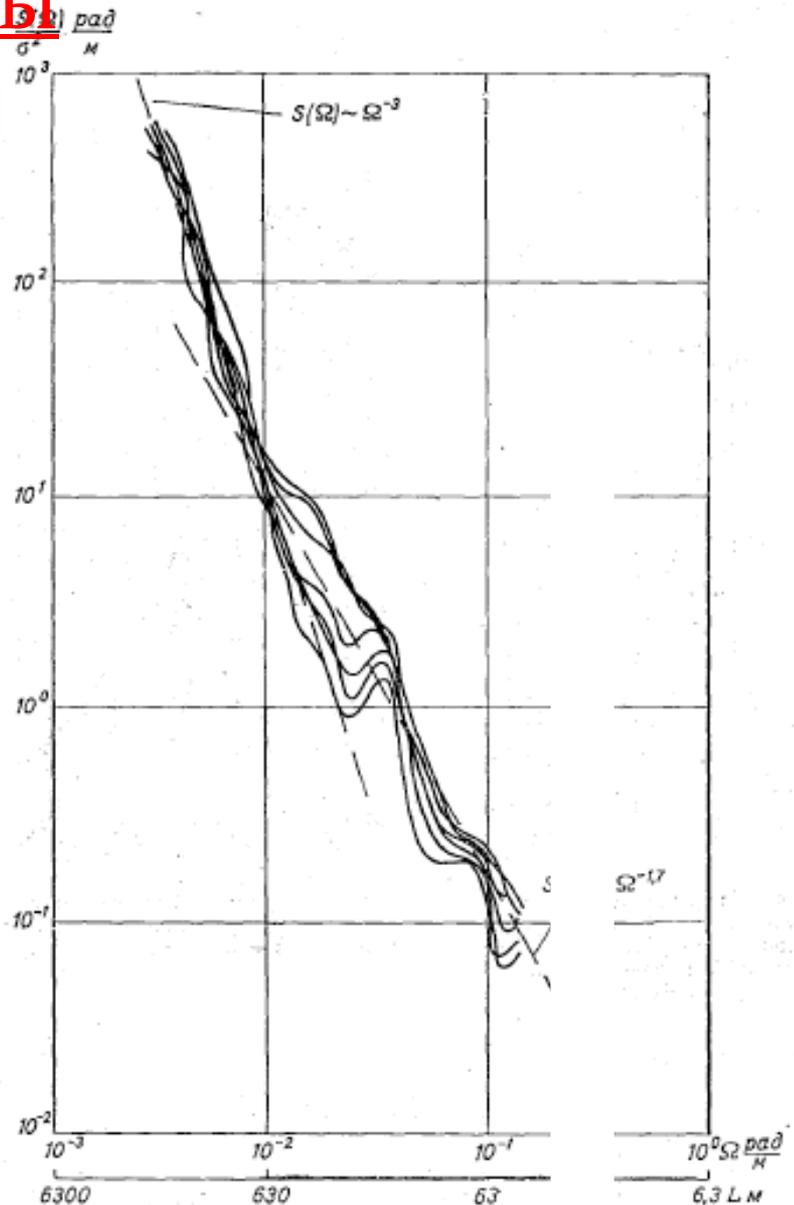


Рис. 4.2. Нормированные по дисперсиям энергетические спектры турбулентности (вертикальная компонента).

Рис. 4.2. Нормированные по дисперсиям энергетические спектры турбулентности (вертикальная компонента).

# Спектры

[1968, L.O. Myrup]

## Turbulence spectra in stable and convective layers in the free atmosphere

By L. O. MYRUP,<sup>1</sup> Atmospheric Research Group and Meteorology Research Inc.

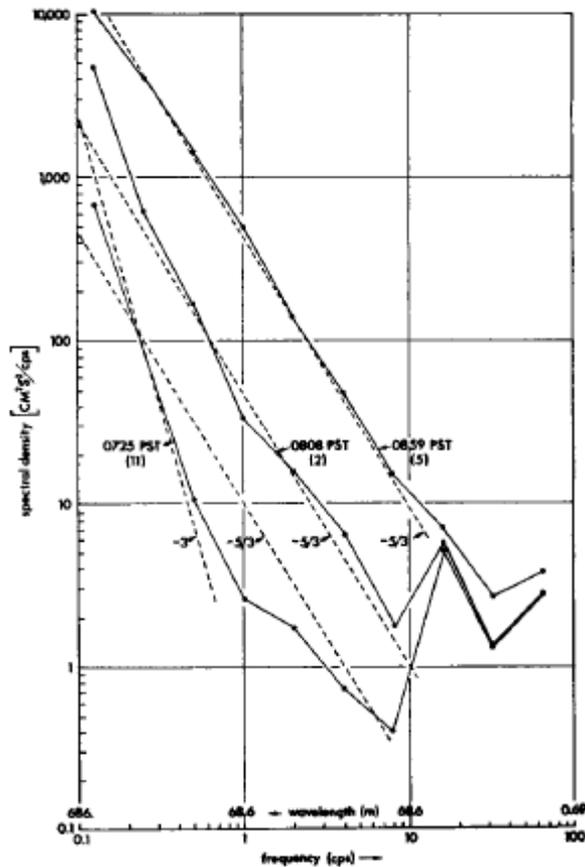


Fig. 4. Averaged aircraft turbulence spectra for longitudinal velocity fluctuations.

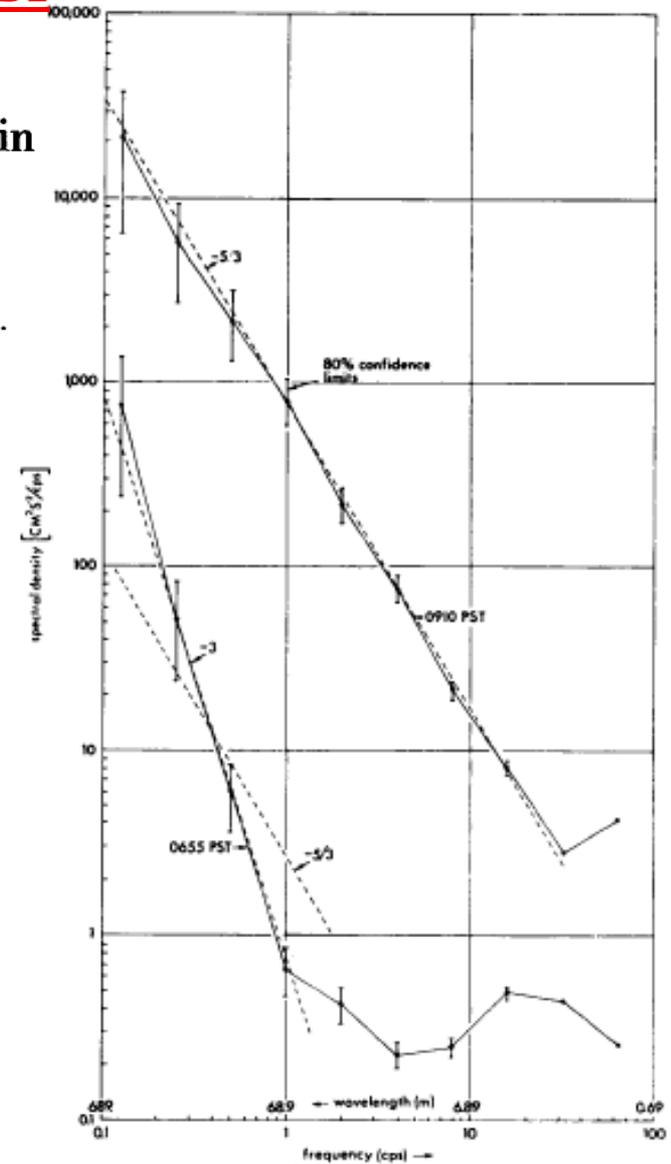


Fig. 5. Turbulence spectra for longitudinal velocity fluctuations computed for the 0655 PST and 0910 PST traverses. The aircraft was flown at an altitude of 1000 feet above a desert dry lake at a speed of  $69 \text{ ms}^{-1}$ .

# Спектры

Вместе с тем известна достаточно простая оценка, позволяющая получить результат Ламли–Шура из простого качественного анализа динамики турбулентности в стратифицированной среде.

- В обычном случае: На работу против сил плавучести тратится

$$\frac{dE}{dt} = gv \frac{\Delta\theta}{\theta} = v_l g \beta \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} l$$

где  $v_l$  – скорость,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $l$  – характерный масштаб вихря. При спектре  $E(k) : \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$  скорость на масштабе  $l$  будет:

$$v_l : \varepsilon^{1/3} l^{1/3}$$

Тогда скорость диссипации энергии перенормируется как

$$\varepsilon^* = \varepsilon + \frac{dE}{dt} = \varepsilon \left( 1 + g \beta \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \varepsilon^{1/3} l^{4/3} \right)$$

Отсюда спектр энергии будет

$$E(k) : \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \left( 1 + b^* k^{-4/3} \right),$$

$$b^* : g \beta \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \varepsilon^{-2/3}.$$

Откуда видно, что на больших масштабах будет работать спектр Ламли–Шура

$$E(k) : g \beta \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} k^{-3}.$$

# Спектры

- Рассмотрим случай (обратного) спирального каскада, когда спектр энергии определяется диссипацией спиральности. (Моисеев, Чхетиани 1996)

При спектре  $E(k) : \eta^{2/3} k^{-7/3}$  скорость на масштабе  $l$  будет:

$$v_l : \eta^{1/3} l^{2/3}$$

Тогда скорость диссипации (генерации) спиральности перенормируется как

$$\eta^* = \eta + \frac{1}{l} \frac{dE}{dt} = \eta \left( 1 + g\beta \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \eta^{-2/3} l^{2/3} \right)$$

Отсюда спектр энергии будет

$$E(k) : \eta^{2/3} k^{-7/3} \left( 1 + b^* k^{-2/3} \right),$$

$$b^* : g\beta \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \eta^{-2/3},$$

откуда видно, что на больших масштабах как и при отсутствии спиральности опять будет работать спектр Ламли–Шура

$$E(k) : g\beta \frac{\partial \bar{T}}{\partial z} k^{-3}.$$

## Spectrum of turbulence with temperature gradient

Charles P Martens

Department of Mathematics and Science  
The University of Hong Kong

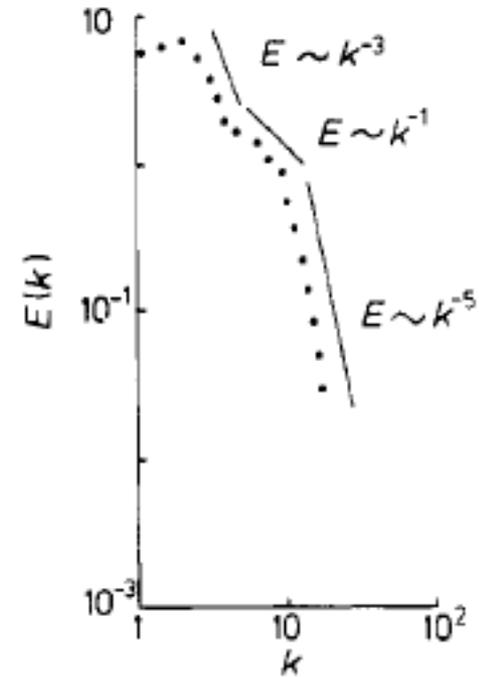
Received 16 August 1974, in final form

*Spectrum of turbulence with temperature gradient*

1763

**Table 1.** Cases in which solutions for spectra are found.

Wavenumber ranges for temperature spectrum	Wavenumber ranges for velocity spectrum		
	$k \geq k_\sigma$ Production- transfer range	$k_\nu > k \gg k_\sigma$ Inertial subrange	$k > k_\nu$ Dissipation subrange
$k \geq k_\beta$ Production-transfer range	Case A <sub>1</sub>		
$k_\lambda > k \gg k_\beta$ Inertial subrange	Case A <sub>2</sub>	Case B <sub>1</sub>	
$k > k_\lambda$ Dissipation subrange	Case A <sub>3</sub>	Case B <sub>2</sub>	Case C



In the inertial subrange the thermal diffusivity can be neglected giving

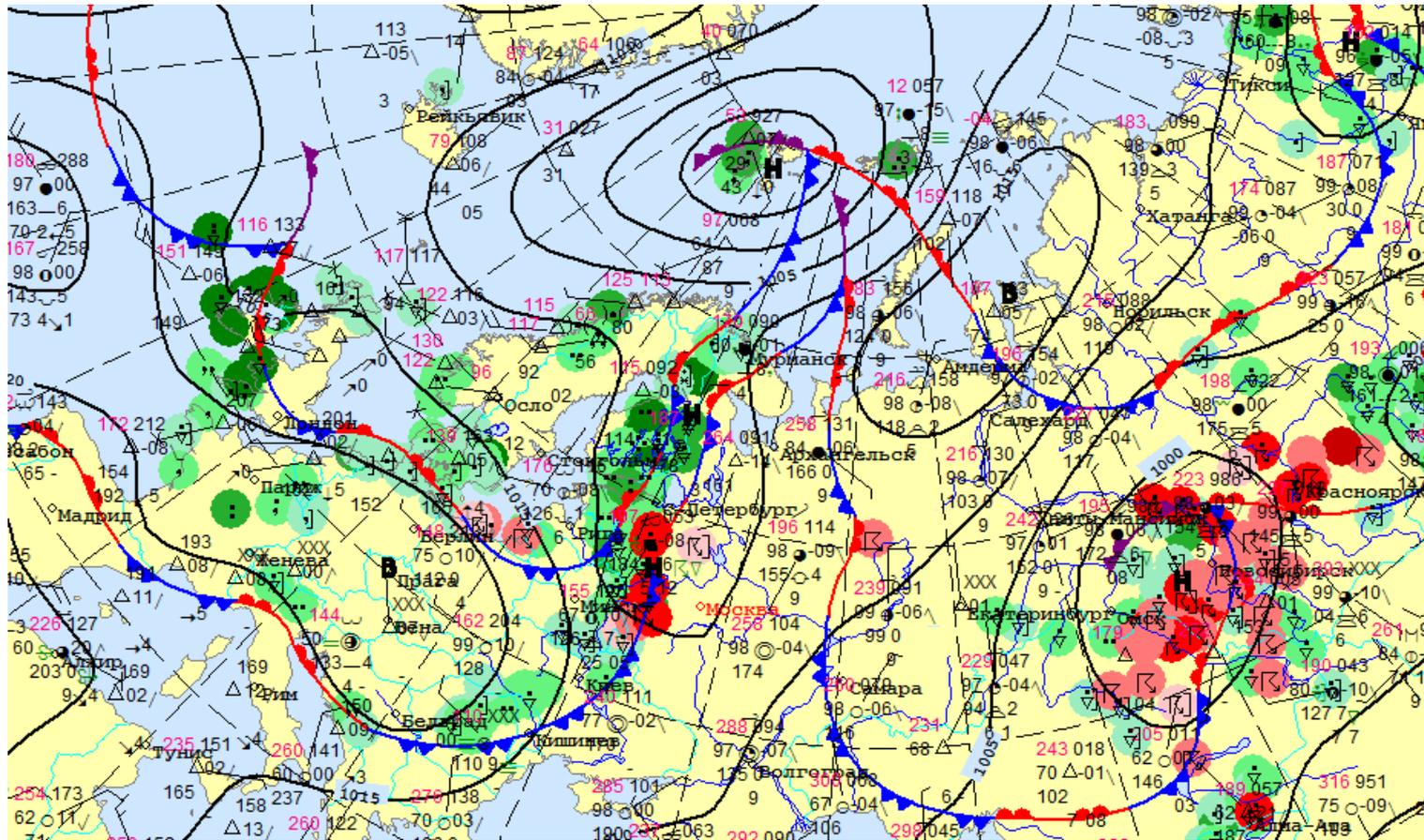
$$E(k) = 2.44 \frac{\epsilon_\lambda}{\sigma} k^{-1}.$$

# Estimation of squall sizes

- Согласно теории [Kolmogorov, 1934], для **квадрата скорости** может быть получено  $v^2 = c_1 * eps * t_1$ , где  $c_1 < 1$ , откуда  $eps = v^2 / c_1 * t_1$ , где используются средние скорости, и **площадь** может быть выражена как  $s = c_3 * eps * t^3$ , где  $c_3$  лежит в диапазоне 10-14, **откуда мы можем получить оценку поперечного масштаба**, которые мы не можем измерить только одной мачтой,  $l = (c_3/c_1)^{1/2} * v * t$ , и отношение  $(c_3/c_1)^{1/2} = ((10-14) / 1)^{1/2}$  примерно равно 3-4. То есть, поперечные размеры шквалов могут быть в среднем в 3-4 раза больше продольных.
- Чтобы получить окончательное соотношение, можно использовать результаты численного моделирования, например, сделанные [Vazaeva et al., 2024], где пространственные размеры фактически различаются в несколько раз, но Для получения более статистически обоснованной информации предлагается использовать большее количество частных случаев. На основании размера шквалов можно оценить энергию разрушений по их характерному времени и силе воздействия.

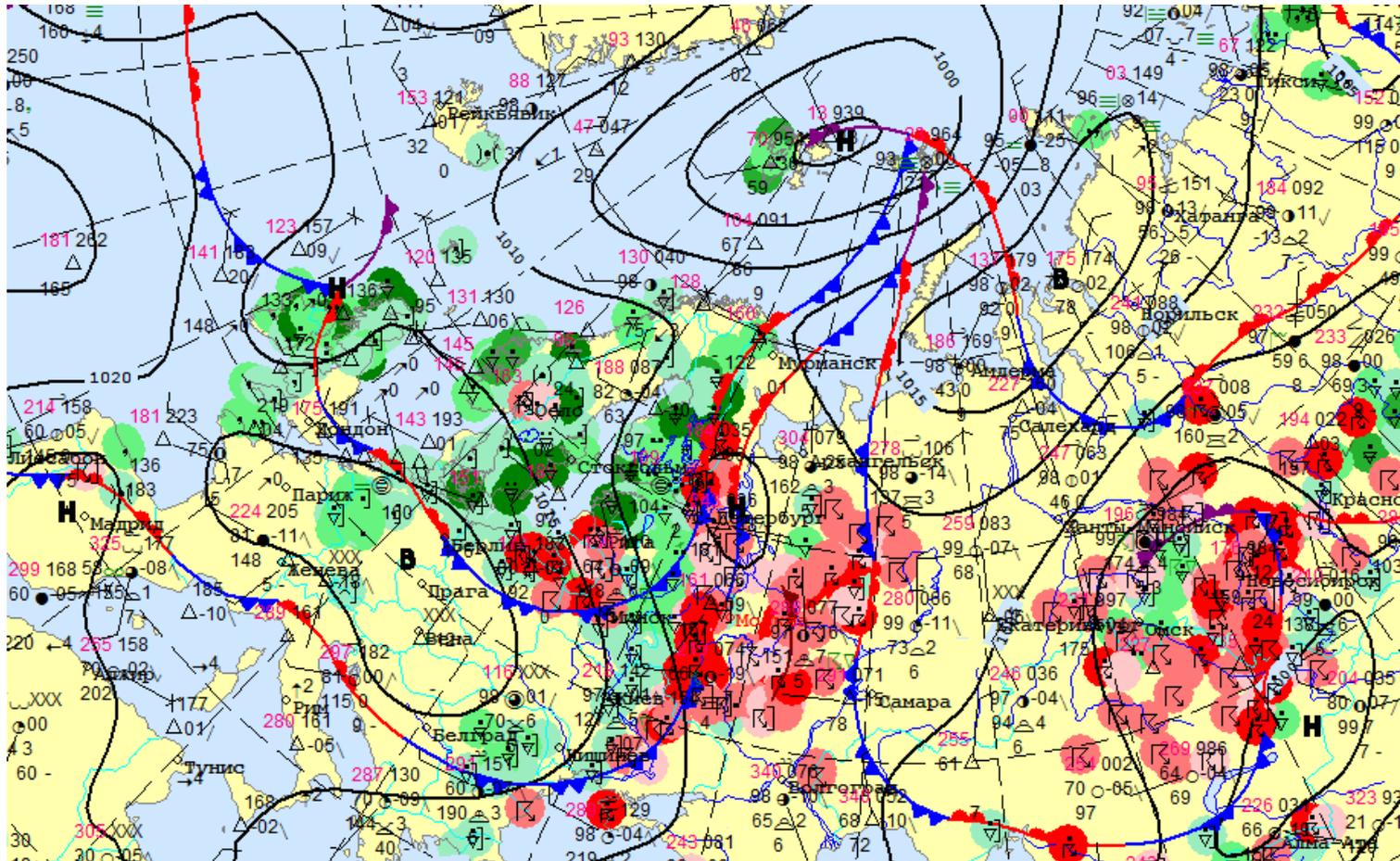
# Частный случай 4.07.2016

- Район Москвы и Обнинска находился на южной периферии обширного циклона с основным центром в районе Шпицбергена. Вторичный центр циклона без замкнутой изобары располагался северо-западнее Москвы. Он образовался на волне холодного и теплого фронтов.



# Частный случай 4.07.2016

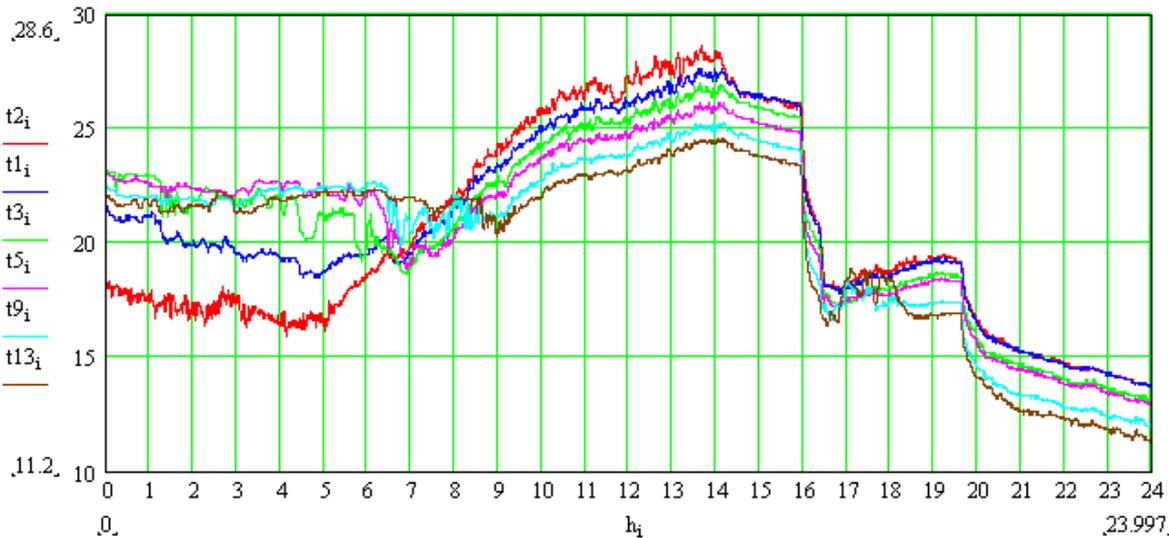
- Примерно в 17:00 ч в Обнинске наблюдался сильный ливень и резкое похолодание: на 80С на высоте 2 м. Прошел холодный атмосферный фронт циклона с вторичным центром в районе Санкт-Петербурга.



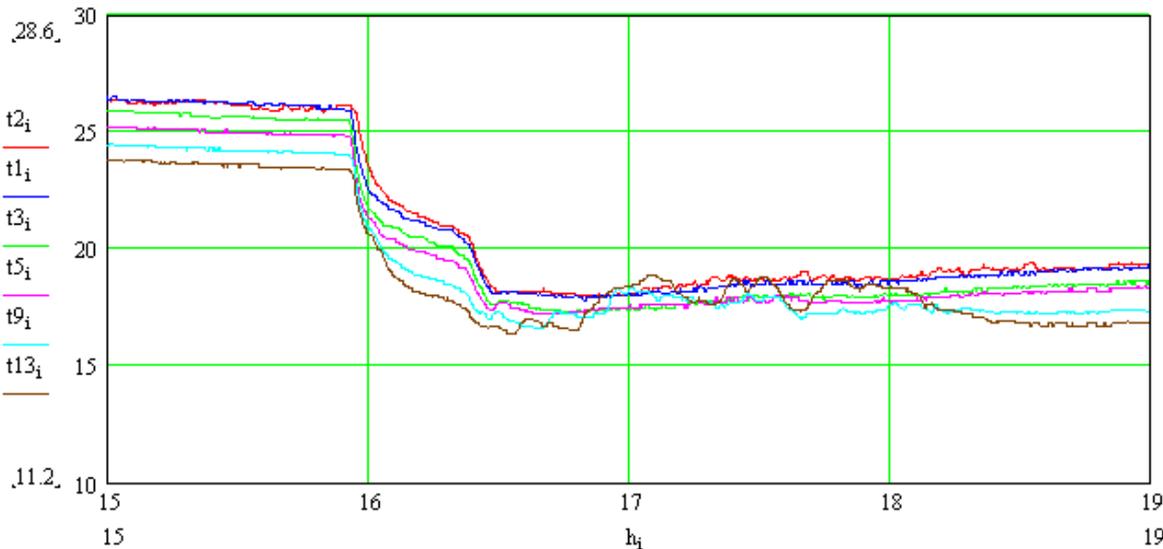
# Частный случай 4.07.2016

- За день до описываемого частного случая, 03.07.2016 г., Обнинск находится в малоградиентном барическом поле седловины. Кучево-дождевые облака имели внутримассовый характер, т.е. не были связаны с фронтами, а были вызваны конвекцией, которая развилась днем после полудня из-за прогрева поверхности. В 13:54 ч в Обнинске начался ливень, гроза. В 14:01 ливень уже был слабым, а в 14:10 закончился.
- Всего в этот день наблюдалось **2 холодных фронта**. На первом фронте резкий одиночный шквал **с максимальной скоростью ветра 18,9 м/с**. На втором фронте, в 19:00 ч по местному времени общее резкое повышение скорости ветра, с 7 до 14 м/с на высоте 301 м.
- Временной ход средних за 10 секунд значений метеопараметров:
  - (1) температуры воздуха на шести высотах в течение суток,
  - (2) атмосферного давления на высоте 2 м, (3) относительной влажности воздуха на высоте 2 м, (4) скорости ветра (м/с) на пяти высотах, (5) направления ветра в градусах на четырех высотах.
- Показано изменение характеристик для всех суток и для времени первого шквала, с 15:00 по 19:00 часов по московскому времени.

# Частный случай 4.07.2016

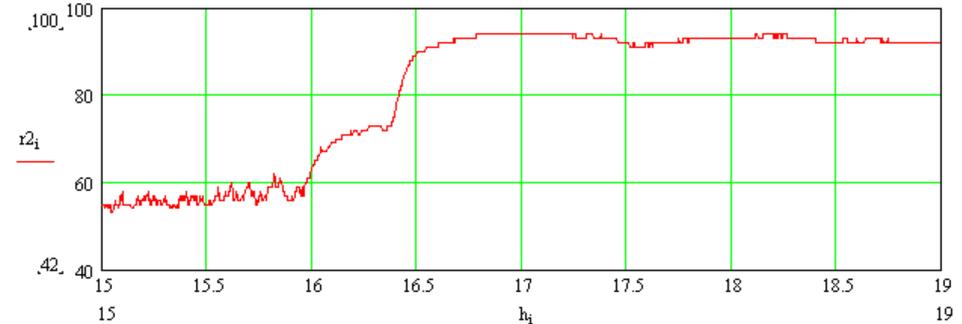
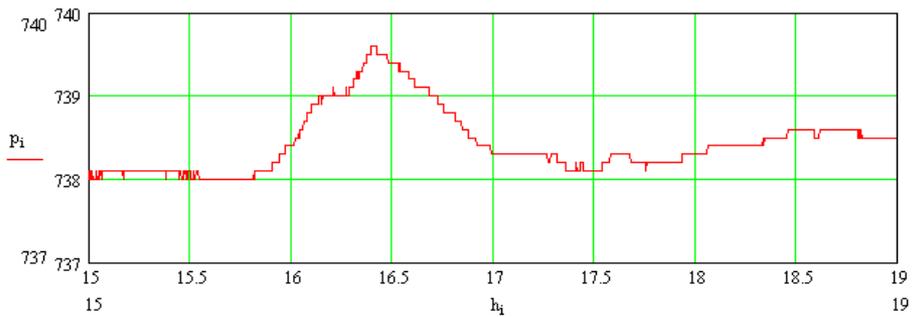
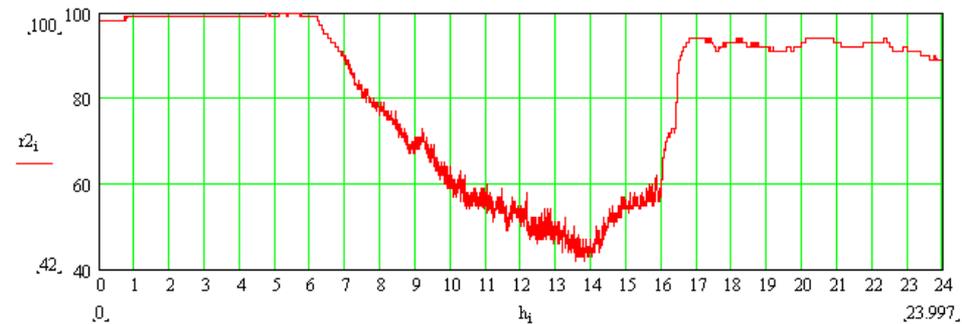


Температура воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) на шести высотах в течение суток. По оси X – час суток.



$t2$  – температура на высоте 2 м;  
 $t1$  – температура на высоте 25 м;  
 $t3$  – температура на высоте 73 м;  
 $t5$  – температура на высоте 121 м;  
 $t9$  – температура на высоте 217 м;  
 $t13$  – температура на высоте 301 м.

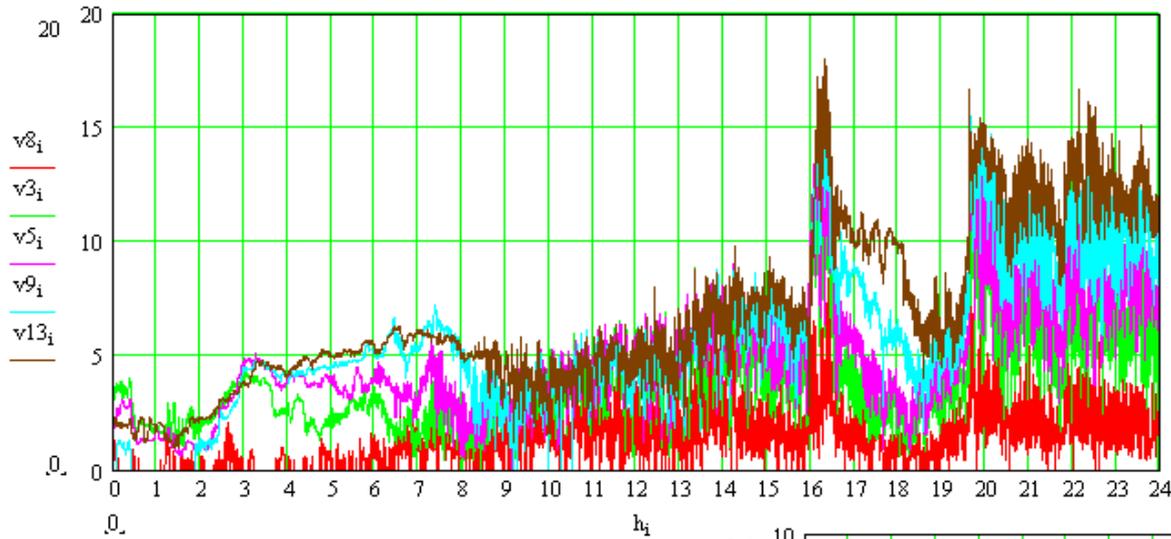
# Частный случай 4.07.2016



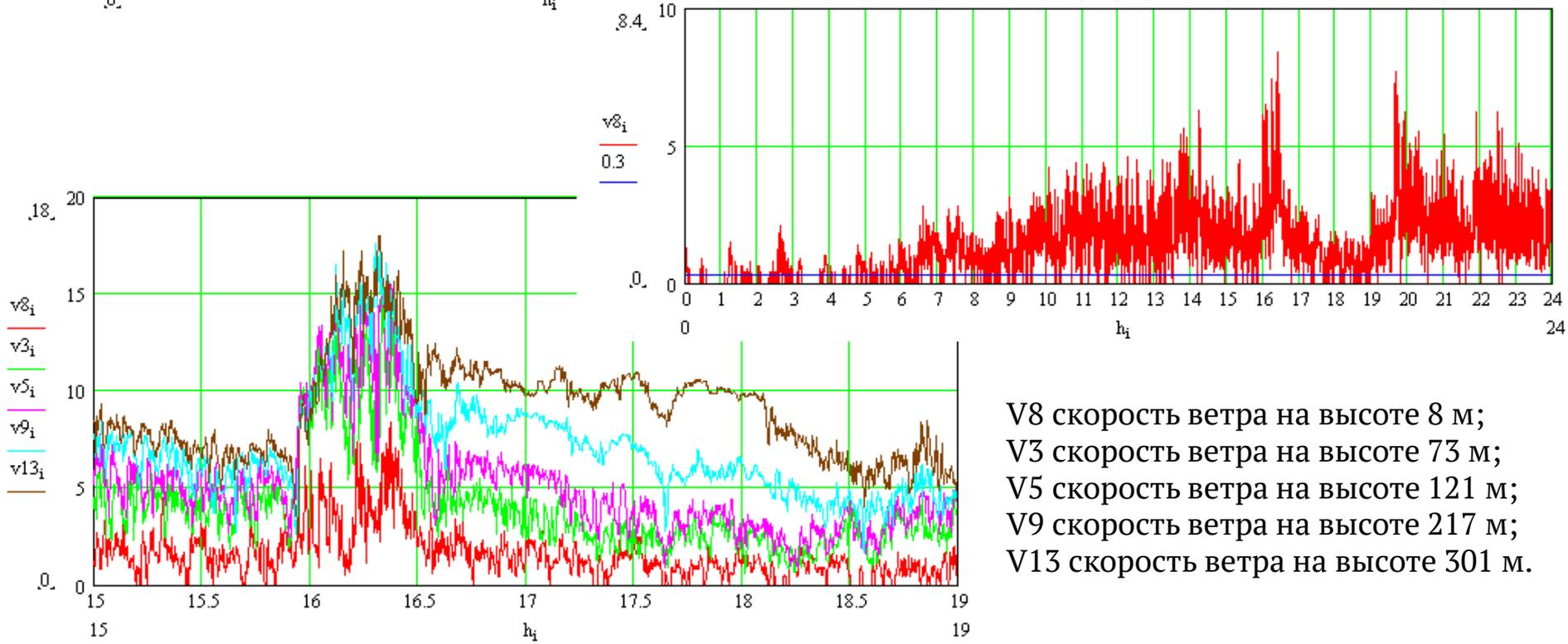
Давление на 2 м

Относительная влажность на 2 м

# Частный случай 4.07.2016

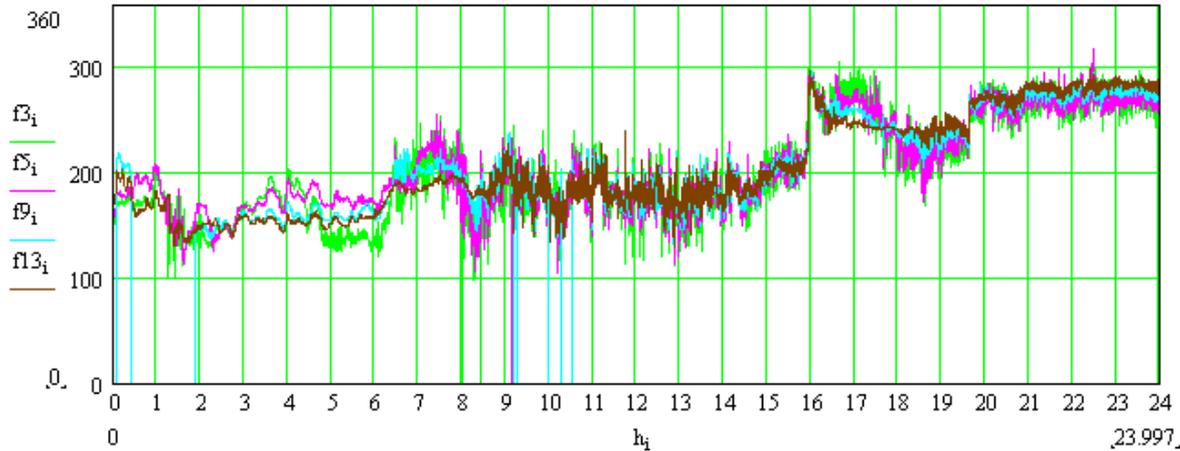


Скорость ветра (м/с) на  
пяти высотах.  
По оси X – час суток.

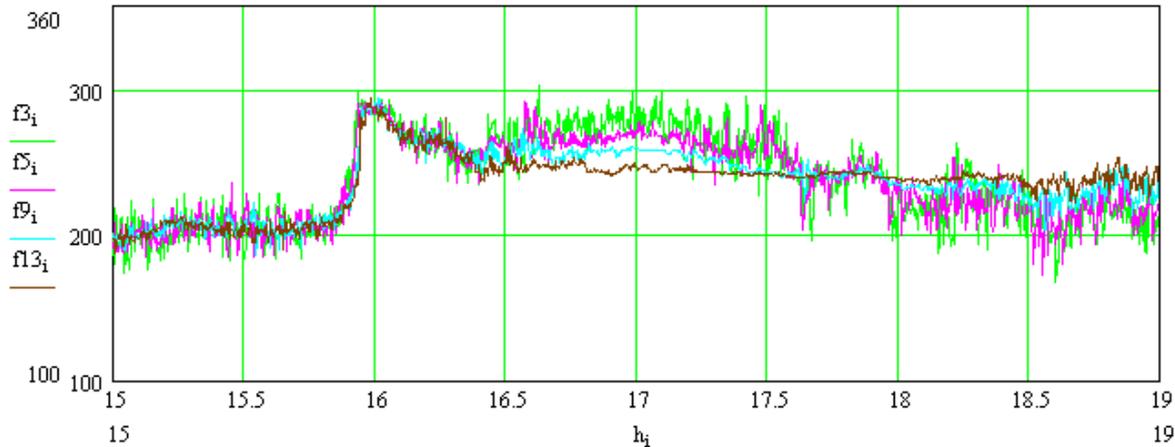


V8 скорость ветра на высоте 8 м;  
V3 скорость ветра на высоте 73 м;  
V5 скорость ветра на высоте 121 м;  
V9 скорость ветра на высоте 217 м;  
V13 скорость ветра на высоте 301 м.

# Частный случай 4.07.2016

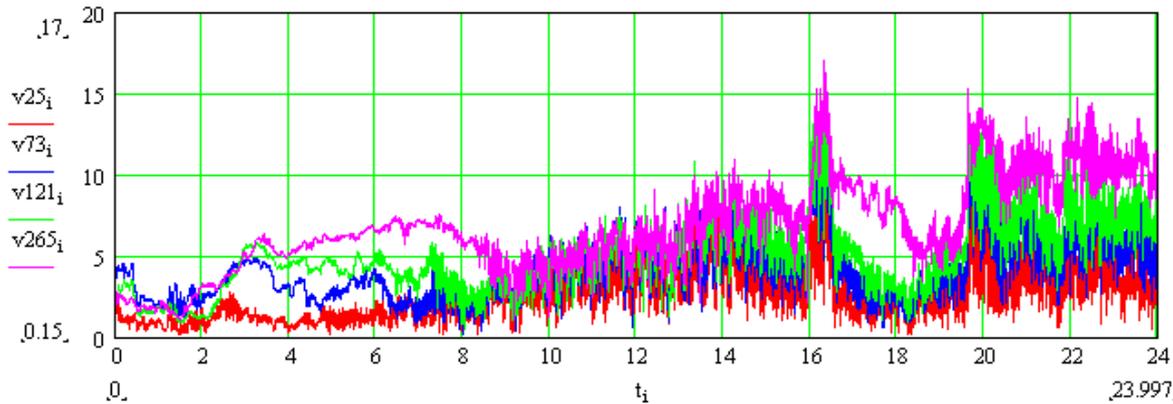


Направление ветра на четырех высотах

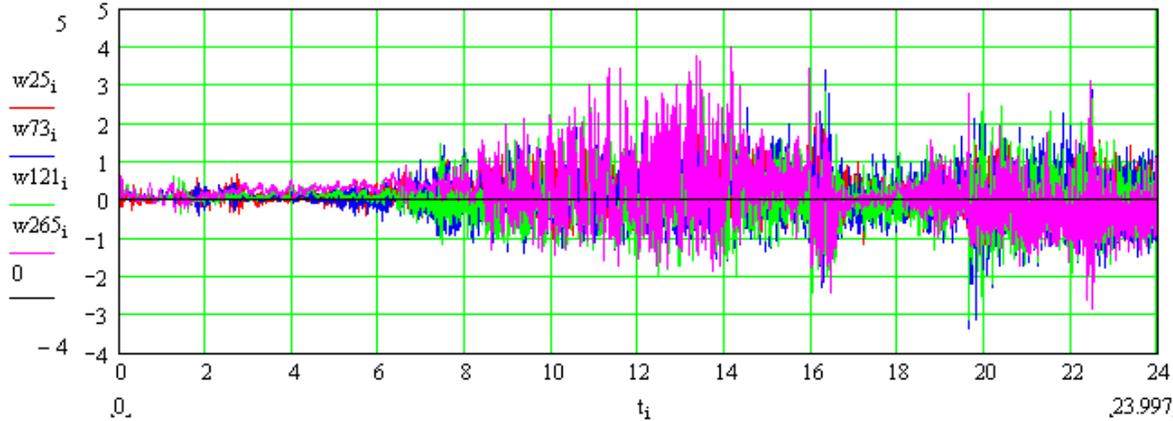


Осадки по данным наблюдателя на полигоне ВММ: ливневой дождь сильный 16:25-16:31; ливневой дождь умеренный 16:23-16:25, 16:31-16:33, 16:42-16:48; ливневой дождь слабый 16:33-16:42, 16:48-М (продолжался после срока наблюдений); гроза с 16:15 до 17:05; 16:42-16:50 над нами. Сумма осадков с 16:00 до 17:00 ч составила 6,9 мм.

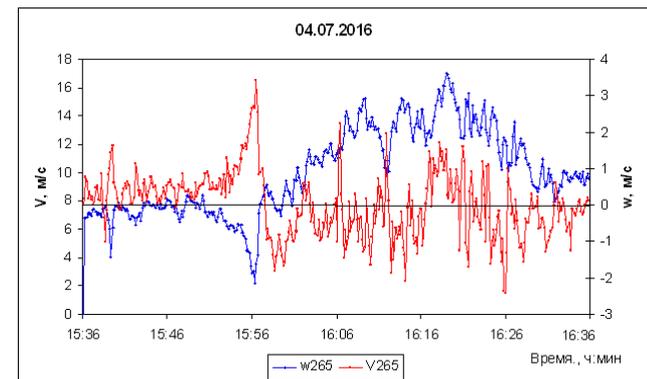
# Частный случай 4.07.2016



Модуль скорости ветра (м/с) на четырех высотах (25, 73, 121 и 265 м)



Временной ход средних за 10 секунд значений метеопараметров, измеренных акустическими анемометрами 81000 фирмы Young, США. Показаны значения скорости ветра по компонентам, такая развертка особенно интересна для определения структуры потока и оценки вертикальных размеров шквалов. Данные скорости, замеренные этим прибором, показывают значения, близкие к измеренным с помощью комплекса МК-15.



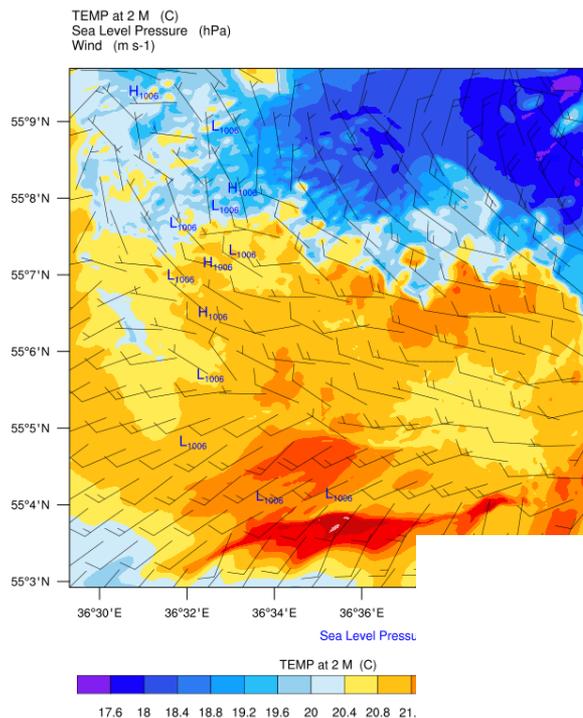
# Модель WRF 4.07.2016

Расчетное время	03.07.2016 12 UTC-05.07.2016 00 UTC
Количество вложенных сеток	5
Тип проекции карты	Lambert
Шаг сетки	1620 м / 540 м / 180 м / 60 м / 20 м
Количество шагов сетки в направлении север-юг	210/211/211/211/211
Количество шагов сетки в направлении восток-запад	210/211/211/211/211
Количество вертикальных уровней	40/40/118/118/118
Шаг по времени для первой области	9 s
Длинноволновая и коротковолновая радиация	Rapid Radiative Transfer Model и Goddard shortwave (Two-stream multi-band scheme)
Поверхностный слой	Monin-Obukhov (Zilitinkevitch)
Модель поверхности земли	Noah, (Chen et al., 2001)
Турбулентности	Схема полной диффузии с использованием трехмерного метода Смагоринского и для LES-моделирования – схема простой диффузии с использованием двухмерного метода (коэффициент К определяется только с использованием горизонтальной деформации)
Микрофизика	Morrison double-Momentum scheme
Атмосферный пограничный слой	Mellor-Jamada-Janjic scheme (Janjic, 1994, MWR), LES scheme
Сальтационная эмиссия	Shao (2011)
Несальтационная эмиссия	Разработанная и внедренная в модель

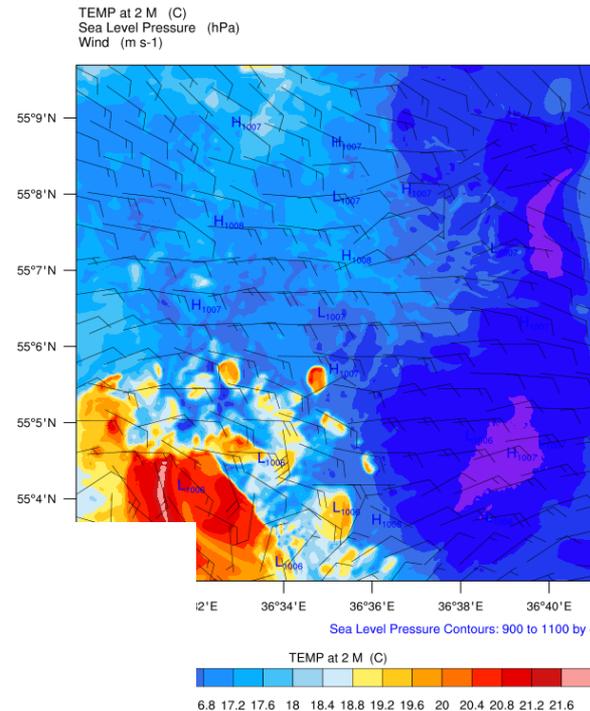
# Результаты моделирования 4.07.2016

Первый шквал:  
12-14 UTC.

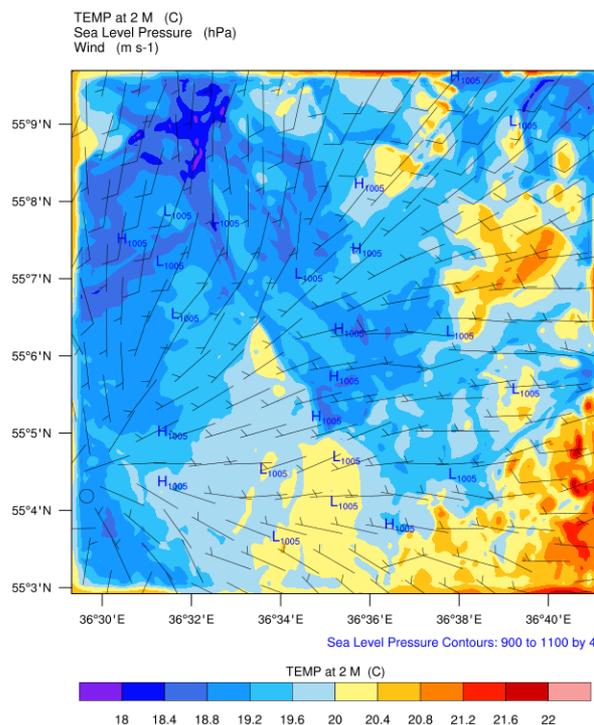
Температура  
Скорость ветра  
Давление на  
уровне моря  
13 UTC



12 UTC



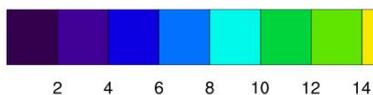
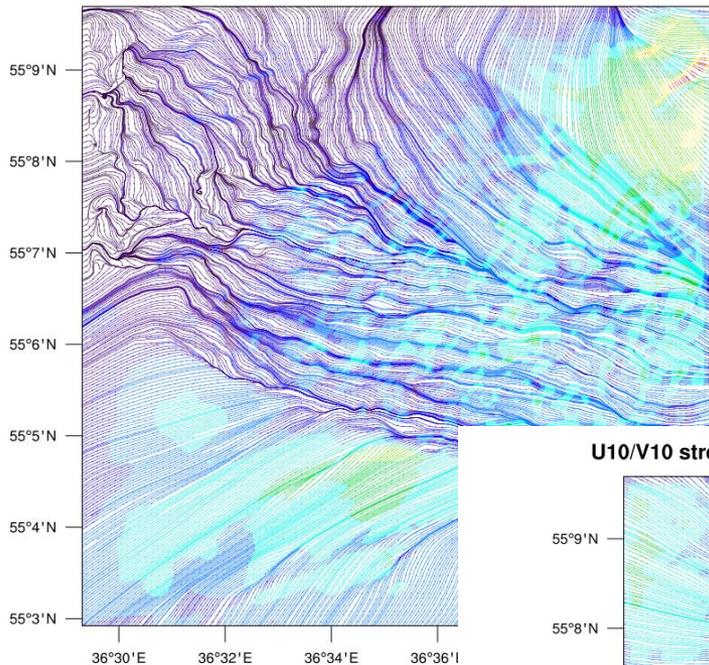
14 UTC



Максимальная скорость -  
19 м/с, что близко к  
данным измерений  
(18.9 м/с).

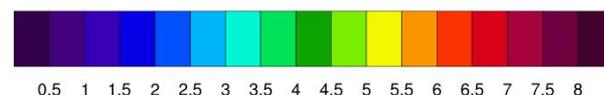
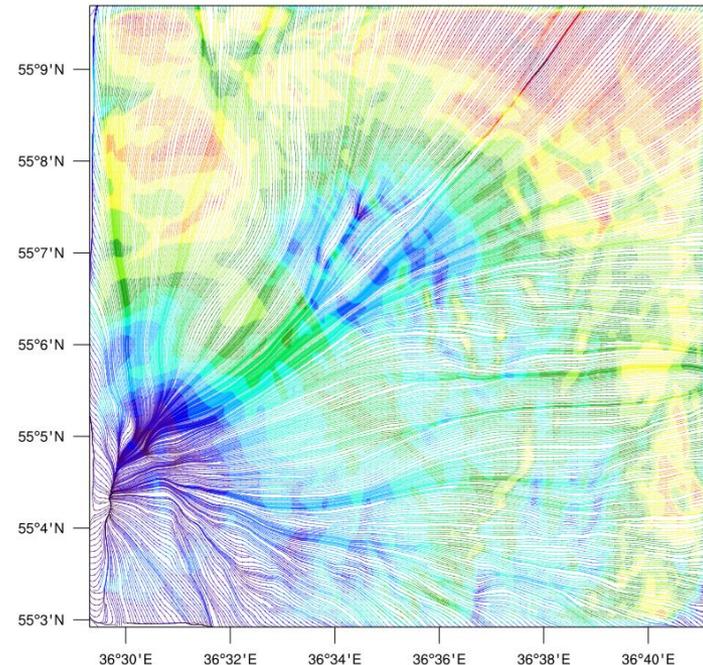
# Результаты моделирования 4.07.2016

U10/V10 streamlines colored by wind speed (native WRF projection)



12 UTC

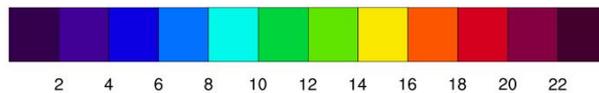
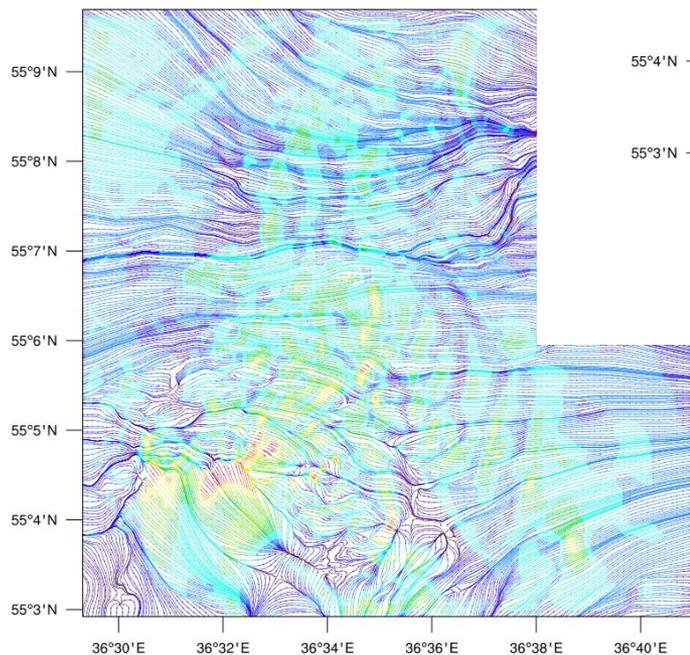
U10/V10 streamlines colored by wind speed (native WRF projection)



14 UTC

13 UTC

U10/V10 streamlines colored by wind speed (nati



Влажность

# Результаты моделирования 4.07.2016

Скорость ветра

Температура

950 гПа

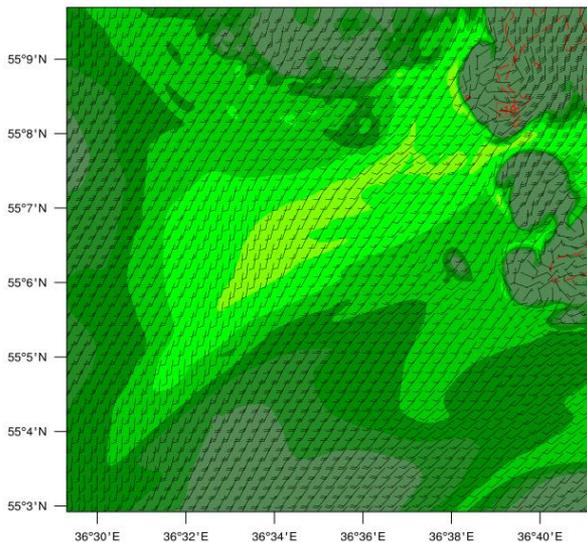
Температура на высоте 2 м в точке расположения ВММ по расчетам изменялась от 23 до 18 °С за указанный промежуток времени от 12:00 до 14:00 ВСВ, и хорошо коррелирует с измеренными значениями, однако начальное значение температуры на 2 м несколько занижено по расчетам (по данным наблюдений от 26 до 18 °С).

12 UTC

13 UTC

14 UTC

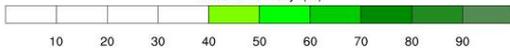
Relative Humidity (%)  
Temperature (C)  
Height (m)  
Wind (kts)



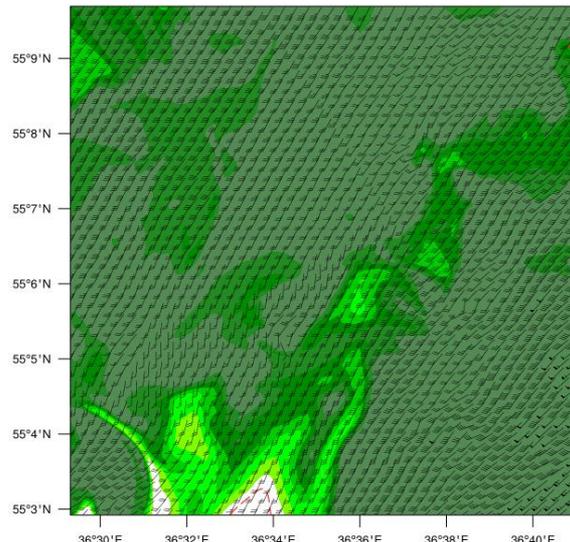
Height Contours: 5650 to 5770 by 60

Temperature Contours: -25 to 0 by 5

Relative Humidity (%)



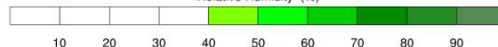
Relative Humidity (%)  
Temperature (C)  
Height (m)  
Wind (kts)



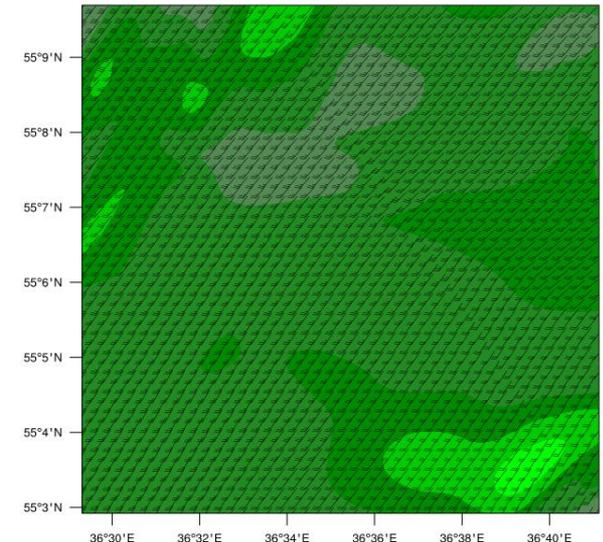
Height Contours: 5650 to 5770 by 60

Temperature Contours: -20 to 0 by 5

Relative Humidity (%)



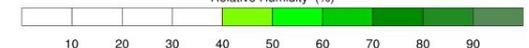
Relative Humidity (%)  
Temperature (C)  
Height (m)  
Wind (kts)



Height Contours: 5685 to 5745 by 60

Temperature Contours: -20 to -5 by 5

Relative Humidity (%)



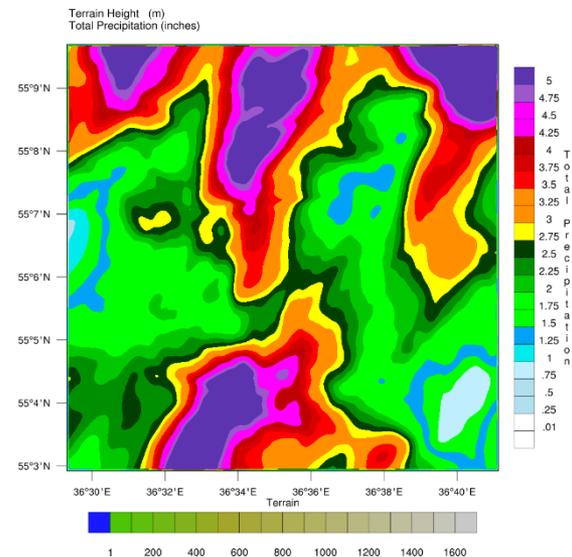
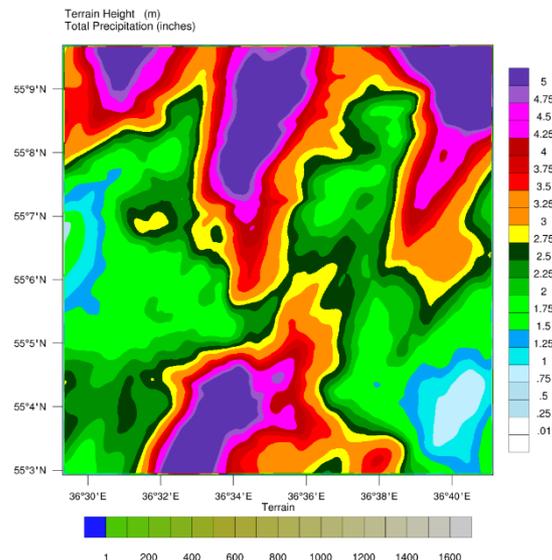
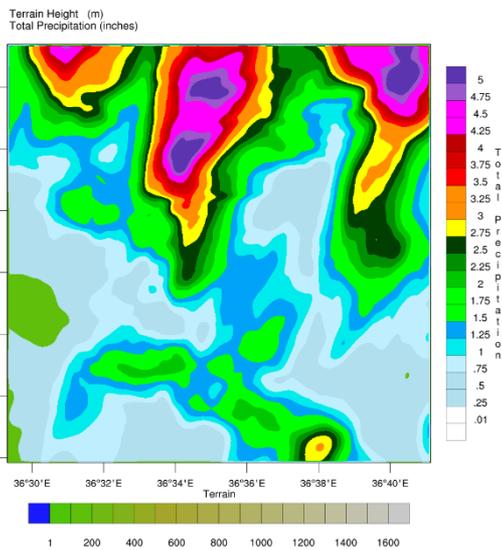
# Результаты моделирования 4.07.2016

- Влажность повышается к моменту первого шквала. Видно влажность и скорость ветра на двух уровнях давления, и влажность и температура по всей высоте позволяют восстановить полную картину геометрических характеристик шквалов и облачности. Последняя влияет на осадки.

12 UTC

13 UTC

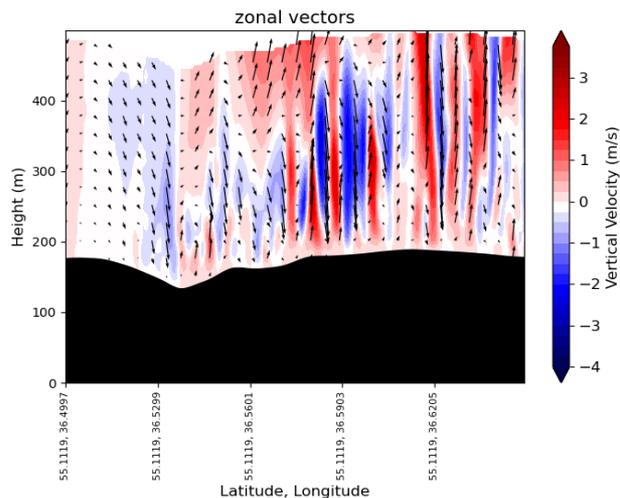
14 UTC



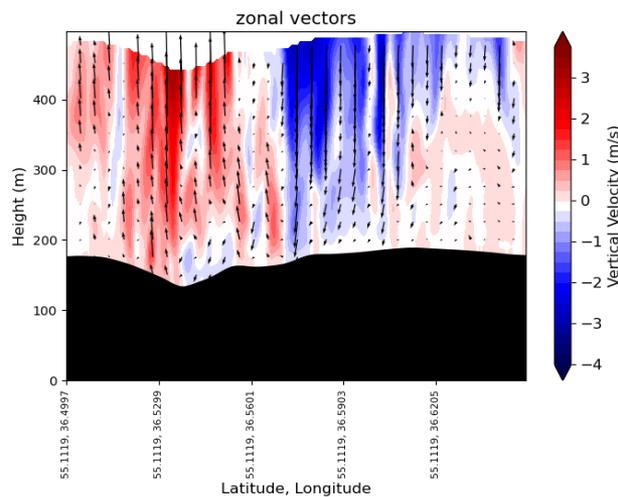
# Результаты моделирования 4.07.2016

- Большой интерес представляет моделирование **вертикальной скорости**, являющейся показателем конвективных движений, связанных с образованием шквалов. Видно соответствие с данными ВММ. **Отчетливо наблюдаются интенсивные конвективные движения в рассматриваемый промежуток времени образования первого шквала**, что совместно с измеренными данными ВММ, позволяет подтвердить участие конвективных механизмов, наблюдаемых в 300-метровом слое, в формировании сильных шквалов.

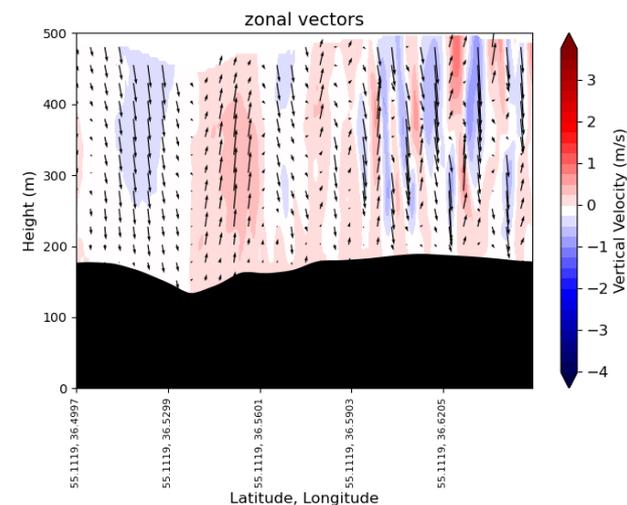
12 UTC



13 UTC



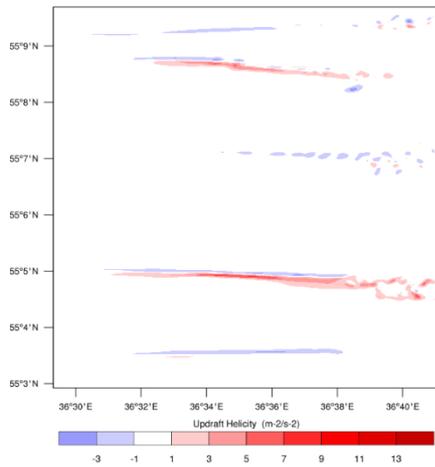
14 UTC



- Интересный результат получен для **updraft helicity** (индекс спиральности), рост которой является индикатором вихревых движений.
- Наблюдаемая картина в момент прохождения шквалов.  
27.09.2018

LEAD REAL-TIME WRF

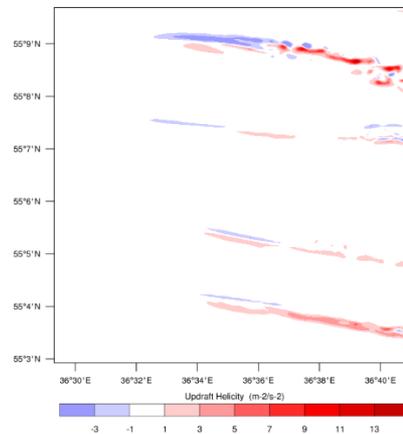
Init: 2018-09-26\_23:00:00  
Valid: 2018-09-27\_11:30:00



OUTPUT FROM \* PROGRAM:WRF-Chem V4.4.1 MODEL  
WE = 211 ; SN = 211 ; Levels = 118 ; Dis = 0.06km ; Phys Opt = 10 ; PBL Opt = 0 ; Cu Opt = 0

LEAD REAL-TIME WRF

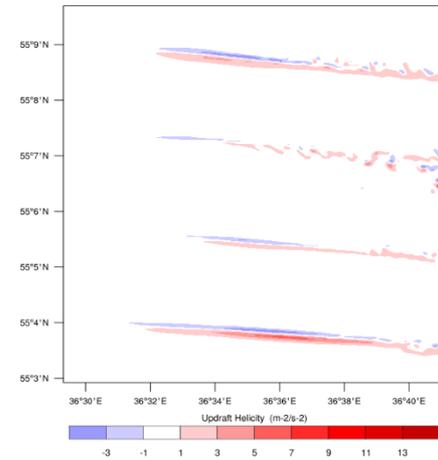
Init: 2018-09-26\_23:00:00  
Valid: 2018-09-27\_12:30:00



OUTPUT FROM \* PROGRAM:WRF-Chem V4.4.1 MODEL  
WE = 211 ; SN = 211 ; Levels = 118 ; Dis = 0.06km ; Phys Opt = 10 ; PBL Opt = 0 ; Cu Opt = 0

LEAD REAL-TIME WRF

Init: 2018-09-26\_23:00:00  
Valid: 2018-09-27\_12:00:00



OUTPUT FROM \* PROGRAM:WRF-Chem V4.4.1 MODEL  
WE = 211 ; SN = 211 ; Levels = 118 ; Dis = 0.06km ; Phys Opt = 10 ; PBL Opt = 0 ; Cu Opt = 0

# Заключение

- По результатам анализа шквалы были поделены на **3** группы:
- - **Группа 1.** Шквалы при **прохождении** нескольких **кучево-дождевых** облаков днем, внутримассовых или перед холодным фронтом. Подгруппы:
  - **1.1.** Максимальная скорость ветра при шквалах меньше 20 м/с на общем фоне слабого или умеренного среднего ветра
  - **1.2.** Максимальная скорость ветра во время одного или нескольких шквалов больше или равна 20 м/с. Средняя скорость ветра умеренная, не превышающая 10-12 м/с
  - **1.3.** На общем фоне сильного ветра, превышающего 10-12 м/с, несколько усилений ветра днем при прохождении кучево-дождевых облаков.
- - **Группа 2.** Шквал **на холодном фронте.** (Внутри первых двух групп случаи шквалов подразделялись по скорости ветра на высоте 301 м: меньше или больше 20 м/с.) Подгруппы:
  - **2.1.** Максимальная скорость ветра во время шквала меньше 20 м/с на высоте 301 м
  - **2.2.** Максимальная скорость ветра во время шквала больше или равна 20 м/с на высоте 301 м
- - **Группа 3.** Резкий шквал, когда скорость увеличивается от **небольшой величины.**

# Заключение 2

- Особый интерес в силу своей внезапной универсальности представляет анализ, соответствующий статистическим распределениям основных диагностических характеристик – скорости, энергии и мощности ветра, – которые могут быть связаны с причинами формирования шквалов и сопутствующих им когерентных структур.
- Статистическая обработка случаев со шквалами и смерчами (со скоростью ветра 25 м/с и более) ранее позволила выявить некоторые закономерности их возникновения [Грищенко, 2009], такие как частота возникновения и районы, наиболее подверженные угрозе этих опасных явлений. Однако точность и заблаговременность прогноза оставались недостаточными и еще требуют дальнейшего изучения.
- Получена оценка масштабов и энергий разрушений изучаемых экстремальных явлений. Используя теорию Колмогорова 1934 года [Колмогоров, 1934], оценка поперечного масштаба шквала, который мы не можем измерить с помощью одной мачты, в среднем в 3-4 раза больше продольного масштаба.

# Заключение 3

- Модель позволит повысить точность оперативного прогноза шквалов, а также совместно с измеренными данными ВММ проанализировать причины возникновения шквалов с учетом конвективных механизмов, наблюдаемых в 300-метровом слое.
- Динамика шквалов во многом определяется циркуляционными структурами разных пространственных и временных масштабов.
- Адаптированная модель WRF способна <sup>(1)</sup>разрешать когерентные структуры различного пространственного и временного масштабов, <sup>(2)</sup>принимать во внимание их влияние на динамику шквалов, <sup>(3)</sup>подтвердить интенсификацию эмиссии аэрозоля когерентными структурами, в частности, сопутствующими шквалам.
- Рассмотрена детальная диагностика частного случая шквала 4 июля 2016 г., по результатам наблюдений на ВММ и численного моделирования на WRF.
- Моделировались температура воздуха на разных высотах, атмосферное давление, относительная влажность воздуха и компоненты скорости ветра. Результаты моделирования хорошо согласуются с данными наблюдений.

Благодарю за внимание!

# Spectra and correlation functions of surface layer atmospheric turbulence in unstable thermal stratification

B.A. KADER, A.M. YAGLOM

*Institute of Atmospheric Physics  
USSR Academy of Sciences, Moscow, USSR*

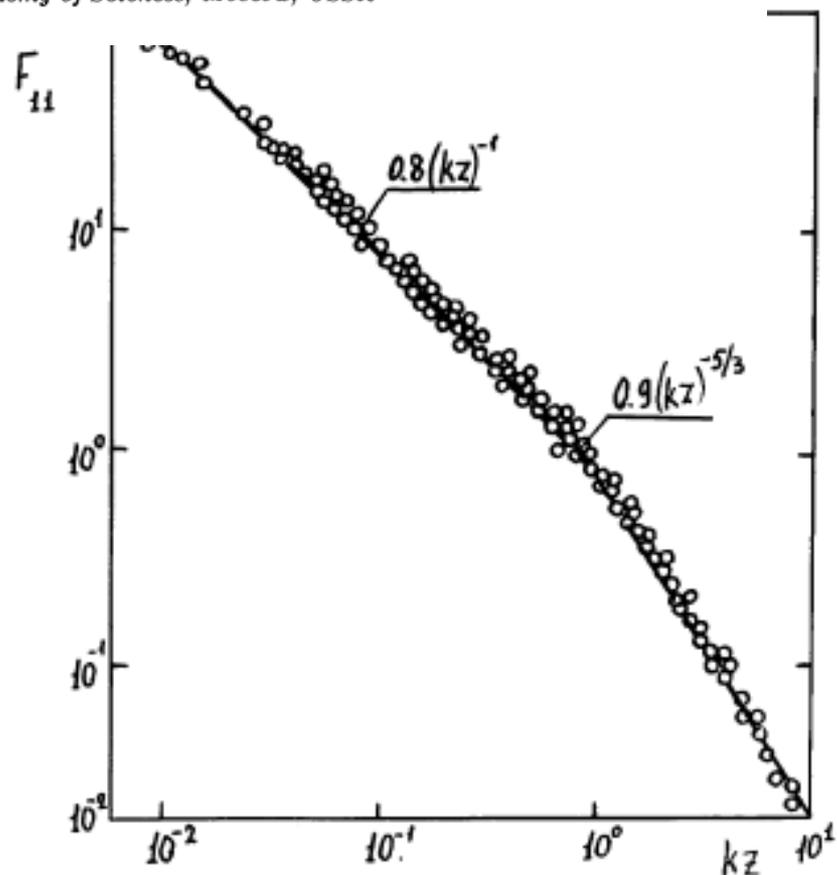


Fig.3. Normalized spectrum  $F_{11} = E_{11}/u_*^2 z$  within the logarithmic sublayers of laboratory boundary layers.

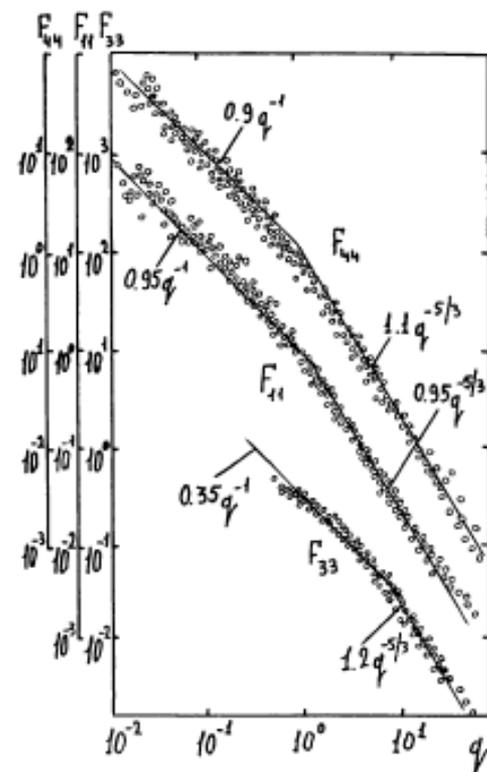


Fig.1. Normalized longitudinal autospectra of surface-layer turbulent stratification

# A MODEL OF TURBULENCE SPECTRA IN THE ATMOSPHERIC SURFACE LAYER

MARTIN CLAUSSEN

*Max Planck Institut für Meteorologie, Bundesstraße 55, 2000 Hamburg 13, F.R.G.*

(Received in final form 7 December, 1984)

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 93, NUMBER 1

JANUARY

## Transport Processes as Foundations of the Heisenberg and Obukhoff Theories of Turbulence

CHAN-MOU TCHEN

*National Bureau of Standards, Washington, D. C.*

(Received August 21, 1953)

The transfer of energy across the spectrum is investigated by the method of the harmonic analysis of the Navier-Stokes equation. The phase correlation which enters into the transfer is determined by the statistical considerations of transport processes. The results obtained allow a theoretical explanation to be given to the Heisenberg and Obukhoff postulates, delimiting the conditions of their applicability. By extending the above considerations of transport processes to shear flow, the production of turbulent energy from the mean flow is determined in spectral terms. As an application, the spectral laws for energy and shear are derived, and compared with measurements.

Project THEMIS  
Technical Report No. 5

THE SPECTRUM OF ENERGY IN TURBULENT  
SHEAR FLOW

by

D. M. Kesic, J. E. Cermak and S. Panchev

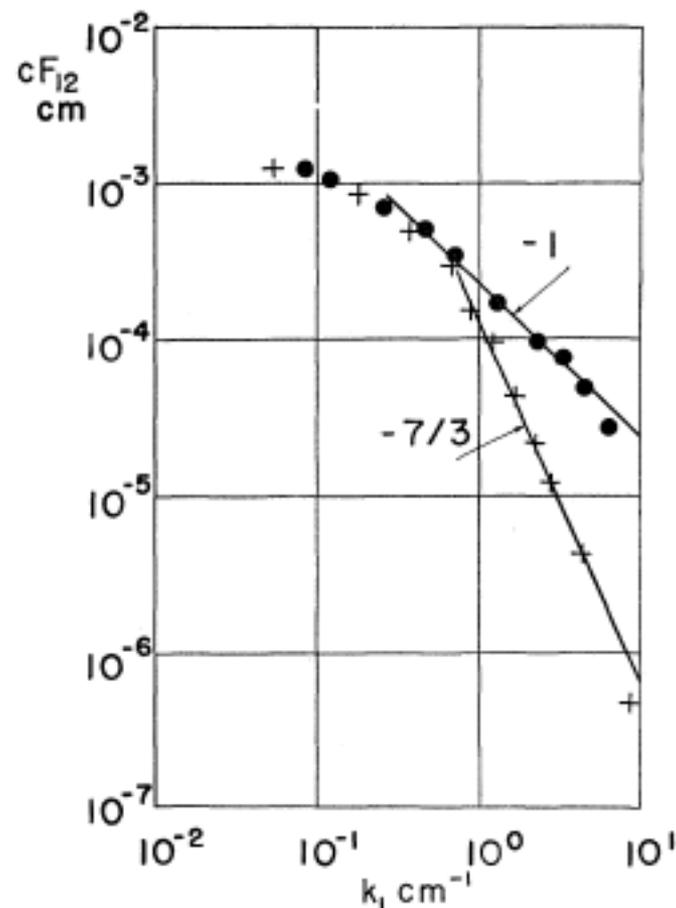


FIG. 2. Shear spectrum in a boundary layer  
(for data see Table II).

## Spectra and correlation functions of surface layer atmospheric turbulence in unstable thermal stratification

B.A. KADER, A.M. YAGLOM

*Institute of Atmospheric Physics  
USSR Academy of Sciences, Moscow, USSR*

asymptotic relations have often a broad range of applicability). The validity of the  $-1$  power law for spectra of the shear-flow turbulence was predicted by Tchen (1953). Later several experimenters found that the data on the velocity and temperature spectra of some laboratory wall flows showed the existence of a wave-number range where the spectral curves had (in the logarithmic representation) the slope  $-1$ . Perry and Abell (1975) and Korotkov (1976) derived the  $-1$  power law for the spectrum of the longitudinal velocity component in tube and channel flows from the assumption of the independence of the spectrum on  $z$  (without indicating the range of validity of the stated assumption). Later Kader (1987) and (1984) showed that this assumption was valid with good accuracy for all the longitudinal spectra and cospectra of velocity components and temperature fluctuations in both the laboratory logarithmic sublayers of turbulent boundary layers and the dynamic sublayers of the ASL. It was also found by Kader that the transition zone between the subrange, where a spectrum satisfies the  $-5/3$  power law and  $-1$  power law, is usually very narrow so that it is possible to assume that these two subranges adjoin each other. The same is also true for the longitudinal cospectra of turbulent fluctuations but with the replacement of the theoretical  $-5/3$  power law by purely empirical  $-7/3$  power law (see Figs.1-4).

### Turbulence spectra in a stably stratified boundary layer

Erich J. Plate<sup>1</sup> and S. P. Arya

Colorado State University,  
Fort Collins, Colorado 80521

(Received August 6, 1969.)

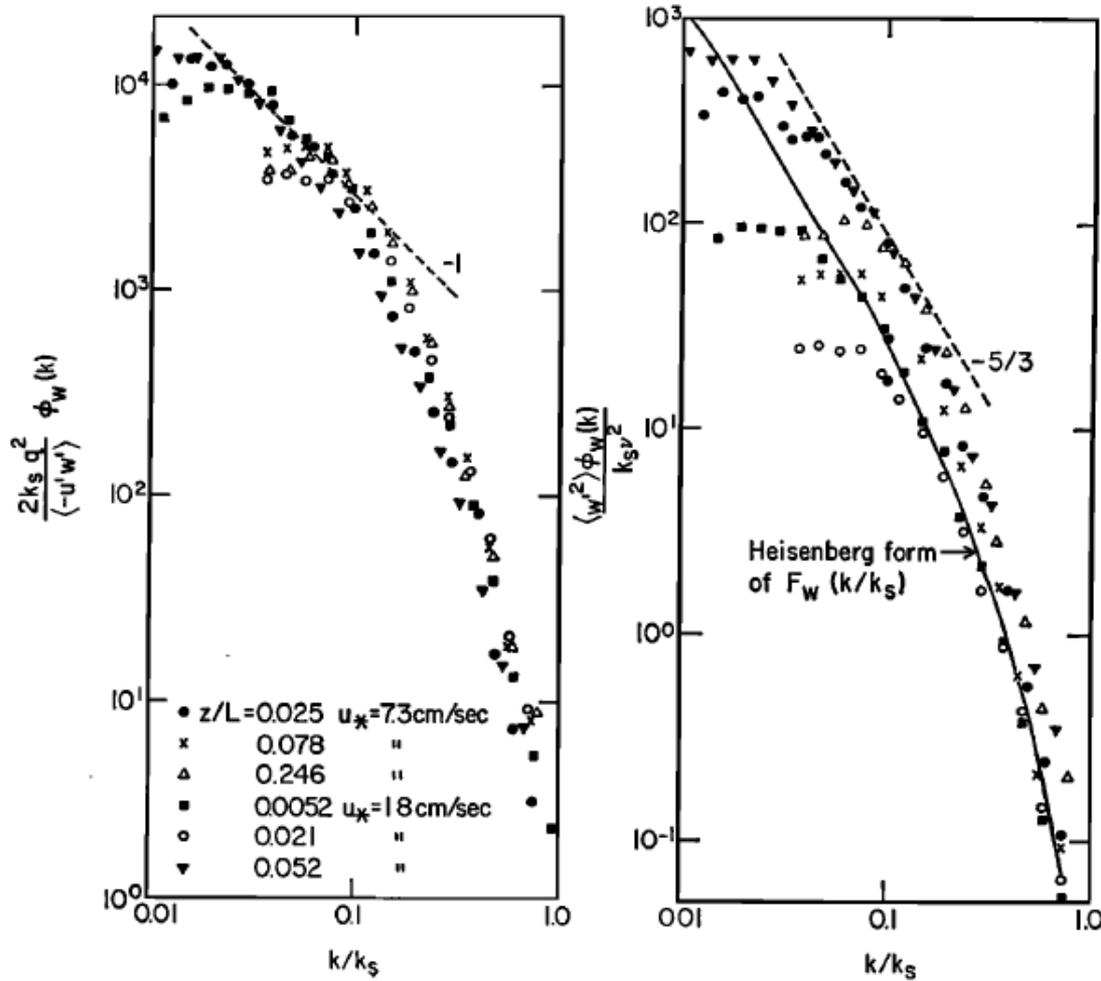


Fig. 3. Nondimensional  $w'$  velocity spectra: 3a (left), magnitude according to equation 10; 3b (right), Kolmogoroff scaling.

УДК 551.510.535

## ТУРБУЛЕНТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ

(Обзор)

*Э. И. Гинзбург, Л. В. Жалковская*

Цель настоящего краткого обзора—суммировать экспериментальные и теоретические данные, описывающие особенности случайного поля  $u'_1$  в верхней атмосфере (область нижней ионосферы) и динамические эффекты, обусловленные наличием такого поля.

При равенстве нулю градиентов усредненного движения соответствующая система уравнений рассматривалась Мониным [19] (а также в [20]). Было получено, что для устойчивой стратификации

$$\text{при } k \gg 1/L_* \quad E(k) \sim k^{-5/3}, \quad \text{при } k \ll 1/L_* \quad E(k) \sim k^{-11/5}. \quad (14)$$

Для неустойчивой стратификации с уменьшением  $k$  спектр вначале достигает максимума, а затем стремится к нулю.

Учету влияния градиента средней скорости на форму спектральной функции посвящены работы Чена [21, 22]. Чен ввел в рассмотрение понятия сильного и слабого взаимодействия завихренностей основного движения  $\left(\sim \frac{d\bar{u}}{dz}\right)$  с завихренностью турбулентности  $\left(\sim \frac{du'}{dz}\right)$ . Случай слабого взаимодействия реализуется в диапазоне частот (или масштабов), где завихренность основного движения мала по сравнению с завихренностью турбулентности. Здесь происходит только перекачка кинетической энергии среднего движения в энергию турбулентности. Сильное взаимодействие имеет место в области, где масштабы изменения средних полей и размеры вихрей в равновесной области сравнимы между собой. Гисина [23] обобщила эти понятия на случай неоднородной температурной стратификации.

Как и следовало ожидать, вне зависимости от характера взаимодействия основных и турбулентных полей в конвективно-инерционном интервале  $E(k) \sim k^{-5/3}$ . Подобласть плавучести имеет место только при сильном взаимодействии основного и турбулентного полей температуры. В конце равновесного интервала при сильном взаимодействии полей скоростей

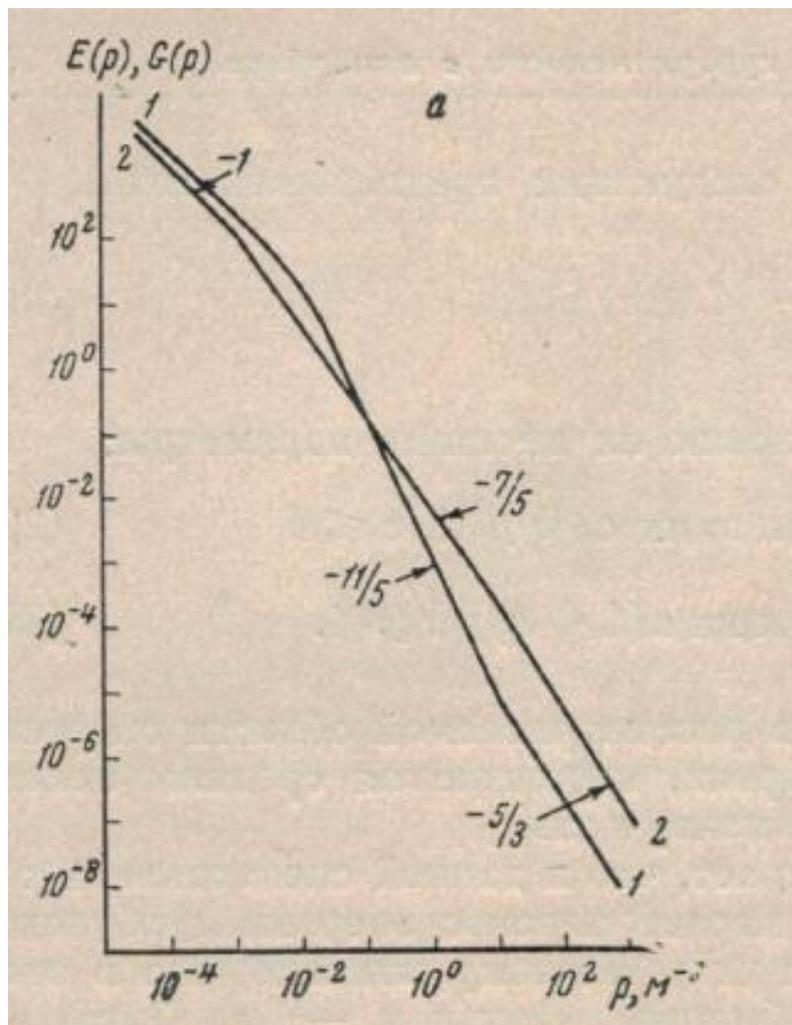
$$E(k) \sim k^{-1}. \quad (15)$$

УДК 551.551.8:532.517.4

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ  
В ТЕРМИЧЕСКИ-СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ АТМОСФЕРЕ**

Ф. А. ГИСИНА

Анализируется точное решение системы спектральных уравнений баланса энергии турбулентности и интенсивности пульсаций температуры. В этих уравнениях для описания переноса энергии турбулентности и пульсаций температуры по спектру используются функции переноса, предложенные Гейзенбергом. Спектральные потоки количества движения и тепла предполагаются равными произведению спектрального коэффициента турбулентной вязкости на завихренность соответствующего турбулентного поля в области малых волновых чисел (сильное взаимодействие). В различных областях волновых чисел находятся асимптотические формулы для спектральных характеристик. Показано, какими преобладающими эффектами обусловлены различные формы спектра.



В рассмотренном нами случае наблюдается баланс между порождением и расходом энергии на работу против плавучести.

*Ф. А. Гисина*

## **РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ТЕРМИЧЕСКИ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ АТМОСФЕРЕ**

Из системы спектральных уравнений баланса энергии турбулентности и интенсивности пульсаций температуры получены формулы для расчета основных характеристик турбулентности. Проведен расчет этих характеристик при разных внешних параметрах.

## **ПРОБЛЕМЫ АВИАЦИОННОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ**

Под редакцией доцента канд. физ.-мат. наук С. В. СОЛОНИНА

- Для решения многих прикладных задач физики атмосферы, в частности в области авиационной метеорологии, нужны детальные сведения о структуре турбулентного поля. Важными статистическими характеристиками потока являются интегральные масштабы, определяющие корреляционную связь пульсаций скорости ветра.

**RESEARCH ARTICLE**

# Replacing wakes with streaks in wind turbine arrays

Carlo Cossu 

Laboratoire d'Hydrodynamique Énergétique et  
Environnement Atmosphérique (LHEEA),  
CNRS - Centrale Nantes, Nantes, France

**Correspondence**

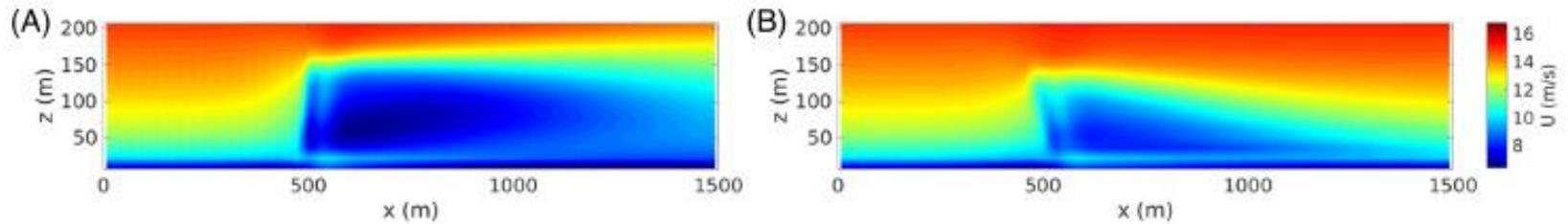
Carlo Cossu, Laboratoire d'Hydrodynamique  
Énergétique et Environnement Atmosphérique  
(LHEEA), CNRS - Centrale Nantes, Nantes,  
France.  
Email: carlo.cossu@ec-nantes.fr

## Abstract

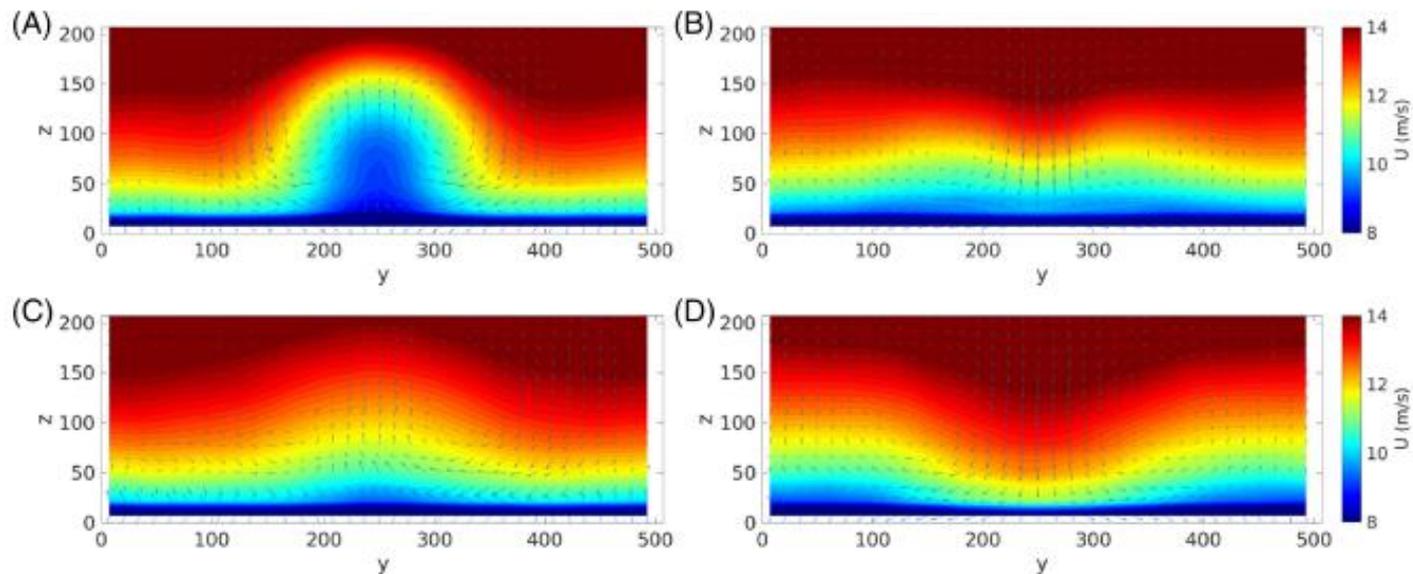
Wind turbine wakes negatively affect downwind turbines in wind farms reducing their global efficiency. The reduction of wake-turbine interactions by actuating control on yaw angles and induction factors is an active area of research. In this study, the capability of spanwise-periodic rows of wind turbines with tilted rotors to reduce negative wake-turbine interactions is investigated through large-eddy simulations. It is shown that, by means of rotor tilt, it is possible to replace turbine far wakes with high-speed streaks where the streamwise velocity exceeds the freestream velocity at hub height. Considering three aligned rows of wind turbines, it is found that the global power extracted from the wind can be increased by tilting rotors of the upwind turbine rows, similarly to what is already known for the case of a single column of aligned turbines. It is further shown that global tilt-induced power gains can be significantly increased by operating the tilted turbines at higher induction rates. Power gains are further increased for higher ratios of rotor diameters and turbine spacings to the boundary layer height. All these findings are consistent with those of previous studies where streamwise streaks were artificially forced by means of spanwise-periodic rows of wall-mounted roughness elements in order to control canonical boundary layers for drag-reduction applications.

## KEYWORDS

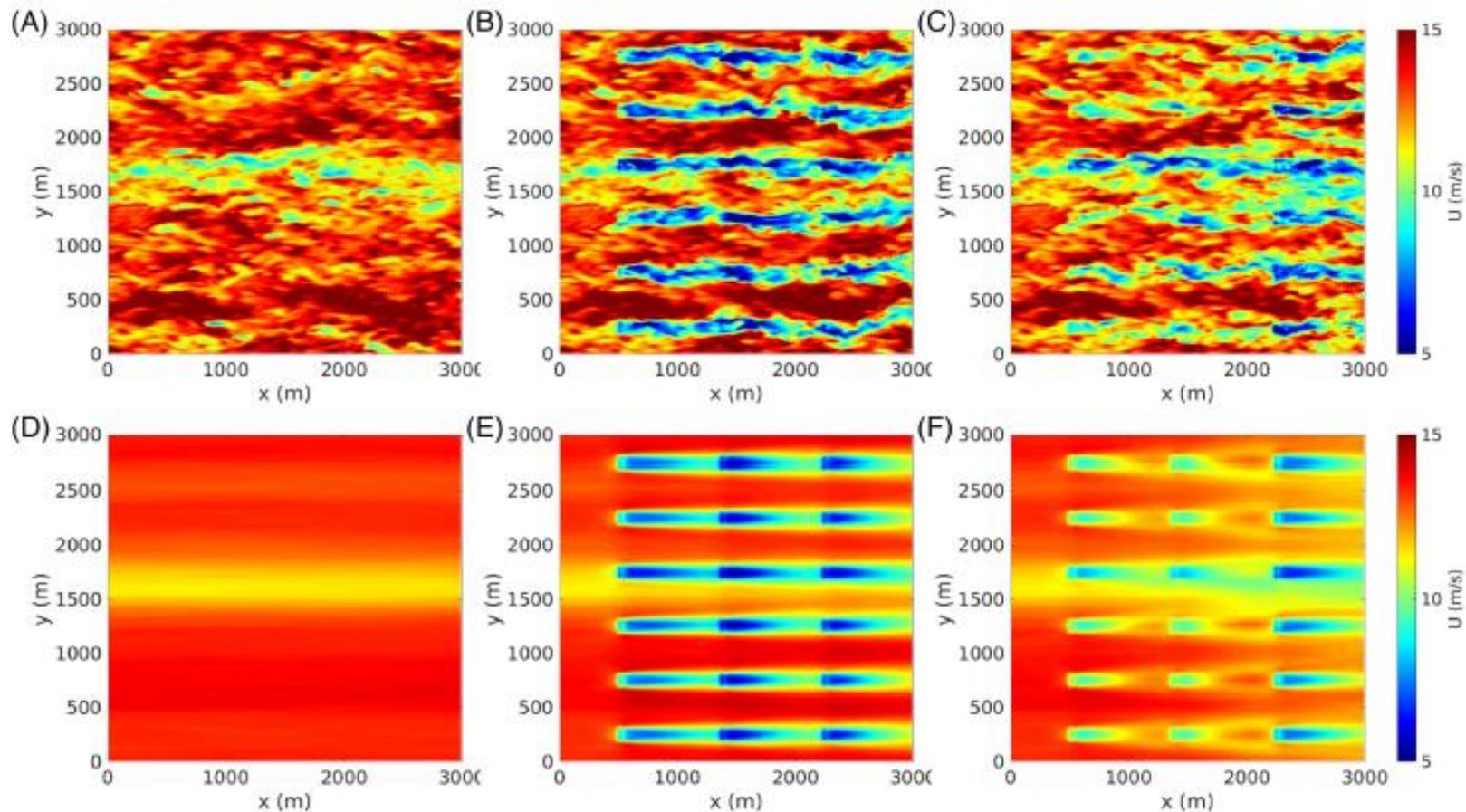
boundary layer streaks, wake redirection, wind energy, wind farm control



**FIGURE 1** Mean streamwise velocity field in the vertical plane cut through the hub axis  $U(x, y_h, z)$  for the reference case (panel A) and for the  $\varphi = 30^\circ$  tilt case (panel B) up to  $\approx 8D$  downstream of the turbine. The flow is from left to right. The same color scale is used in both panels [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]



**FIGURE 3** Mean streamwise (color scale) and cross-stream (vectors) velocity fields corresponding to the reference case (panels on the left, A and C) and to the  $\varphi = 30^\circ$  tilted rotor case (panels on the right, B and D) in the cross-stream planes at  $x = x_h + 7D$  (top row, panels A and B) and  $x = x_h + 20D$  (bottom row, panels C and D). The same color scale is used in all panels for the streamwise velocity, but cross-stream velocity vectors are rescaled to improved readability [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]



**FIGURE 5** Instantaneous (top panels A, B, C) and time-averaged (bottom panels D, E, F) streamwise velocity field in the horizontal plane at hub height  $z_h = 89$  m for the precursor simulation (left panels A, D), the reference case (middle panels B, E) and the case where rotors of the upwind and middle rows are tilted by  $\varphi = 30^\circ$  (right panels C, F). The same color scale is used in all panels. All turbines have  $D = 126$  m and are operated at  $C_T^* = 1.5$ . The flow is from the west (left to right). The signature of a persistent large-scale boundary layer low-speed streaks is clearly discernible near  $y \approx 1600$  in all panels [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]

# Scaling of turbulence spectra measured in strong shear flow near the Earth's surface

T Mikkelsen<sup>1</sup> , S E Larsen , H E Jørgensen, P Astrup and X G Larsén 

DTU Wind Energy, Denmark

E-mail: [tomi@dtu.dk](mailto:tomi@dtu.dk)

Received 30 May 2017, revised 25 September 2017

Accepted for publication 6 October 2017

Published 1 November 2017

Phys. Scr. 92 (2017) 124002

T Mikkelsen et al

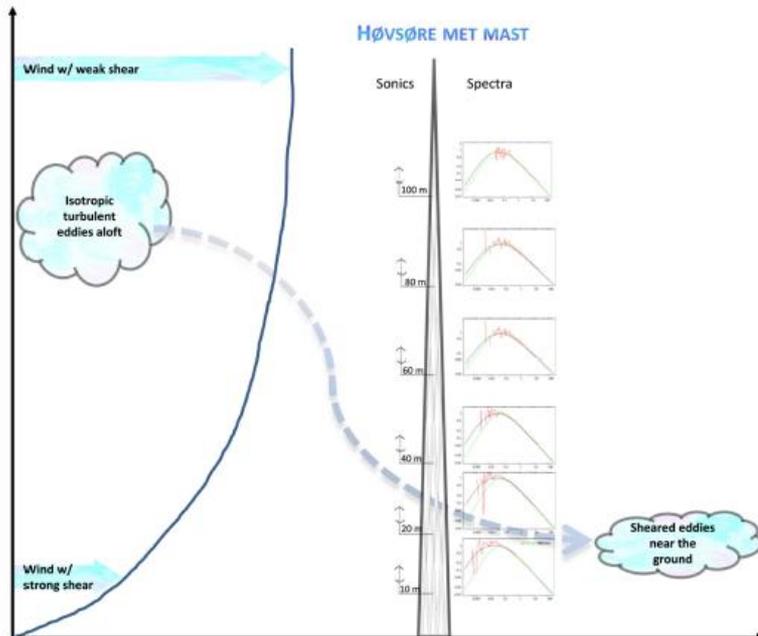


Figure 1. Full-scale field experimental setup located in the 125 m tall meteorological mast at Høvsøre, Jutland, Denmark.

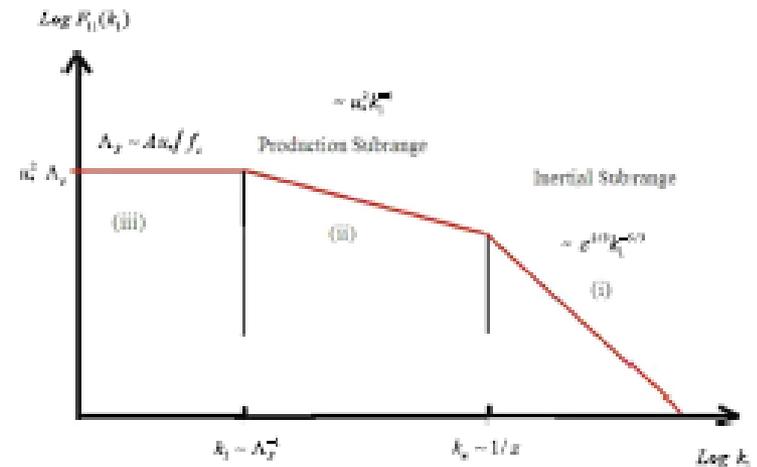
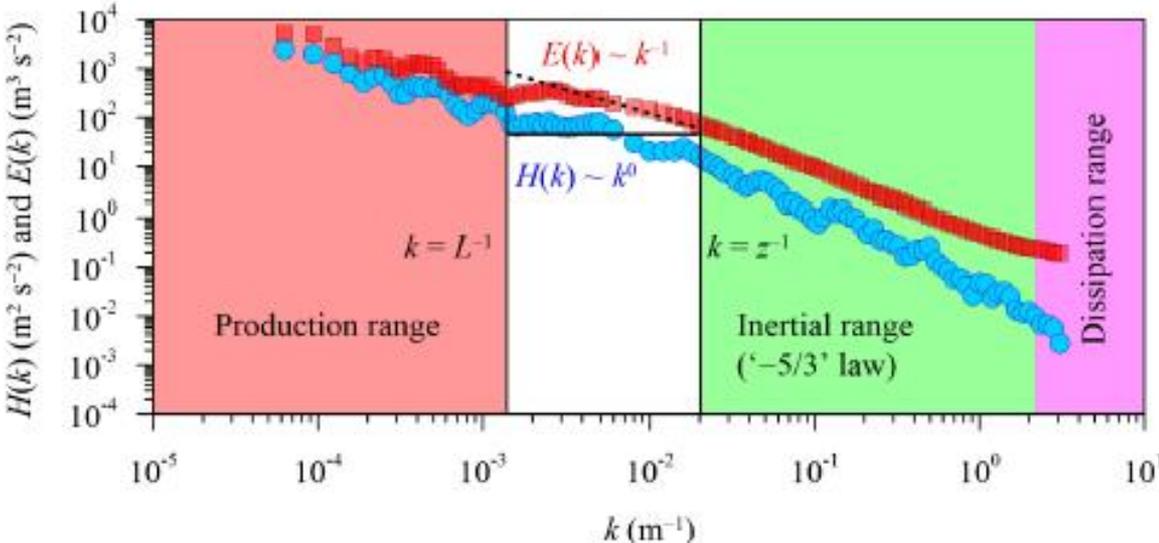


Figure 3. The three spectral regimes of boundary layer wind speed turbulence characterized by [3]: (i) inertial subrange with spectral law  $-5/3$ ; (ii) shear production subrange in the eddy surface layer characterized by strong shear close to the surface (also denoted as ‘the eddy shear layer’) with an inverse linear (degree  $-1$ ) spectral power law; and (iii) a ‘flat’ subrange of ‘zero’ power spectral law characteristic of a component spectrum of turbulence with a single outer length scale  $A_p$ .

# Discovery of the zeroth law of helicity spectrum in the pre-inertial range of wall turbulence

Cite as: Phys. Fluids 34, 071401 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0093998>  
 Submitted: 31 March 2022 • Accepted: 10 June 2022 • Published Online: 06 July 2022

Sk Zeeshan Ali and Subhasish Dey



**FIG. 3.** Helicity spectrum  $H(k)$  (circles) and energy spectrum  $E(k)$  (squares) obtained from measurements.<sup>4</sup> The spectral behaviors in different ranges include the following: (i) the production range ( $k \leq L^{-1}$ ); (ii) the pre-inertial range ( $L^{-1} < k \leq z^{-1}$ ), where  $\varepsilon(k)$  and  $\eta(k)$  obey  $\varepsilon(k) \sim k$  and  $\eta(k) \sim k^2$ , respectively; (iii) the inertial range ( $z^{-1} < k < k_d$ ), where  $\varepsilon(k)$  and  $\eta(k)$  are independent of  $k$  as  $\varepsilon(k) = \varepsilon_i$  and  $\eta(k) = \eta_i$ ; and (iv) the dissipation range ( $k \geq k_d$ ). The pre-inertial range evidences the zeroth law of helicity spectrum (solid line, given by  $H(k) \sim k^0$ ). The  $-1$  spectral law of energy spectrum (broken line, given by  $E(k) \sim k^{-1}$ ) is also preserved in the pre-inertial range.

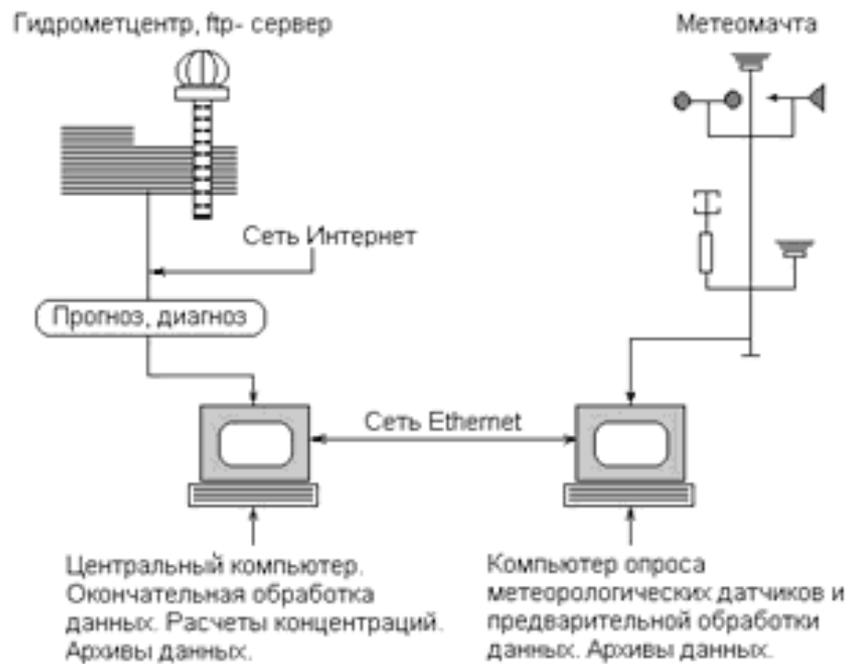


Рис. 1. Схема прогностического измерительно-вычислительного комплекса

