

V Всероссийская конференция с международным участием

Турбулентность, динамика атмосферы и климата

Горчаков Г.И., Чхетиани О.Г., Карпов А.В., Гущин Р.А., Даценко О.И.

# **Турбулентные потоки аэрозоля и тепла при всплесковой эмиссии пылевого аэрозоля**

ИФА РАН 2024

# Минеральный пылевой аэрозоль

В настоящее время много внимания уделяется исследованием минерального пылевого аэрозоля (МПА), который (1) заметно влияет как прямо, так и косвенно на радиационный режим атмосферы, (2) на процессы в биосфере (3) на здоровье населения. Значительная часть ПА поступает в атмосферу с ОТ.

# Полевые эксперименты

- Мы занимаемся исследованием МПА с 1982 г., когда проф. Г.В. Розенбергом была организована экспедиция АРАЭКС-82
  - В XXI веке было организовано 14 экспедиций на опустыненные территории вблизи р. Волги (Астраханская обл.) и в Калмыкию
- РНФ 20-17-00214

# Песчаная территория вблизи Волги 2024 г.



# Мачтовый комплекс



# Экспедиция ИФА (2024 г.)



# Счетик сальтирующих частиц



# Экспедиция закончилась



# Аппаратурные комплексы

- На ОТ с помощью автоматизированных аппаратурных комплексов измерялись (на двух-трех уровнях):
- флуктуации компонент скорости ветра и температуры воздуха,
- распределения частиц МПА по размерам в диапазоне 0.5-5.0 мкм.
- электрические характеристики ВПП, включая плотность электрических токов, возникающих при переносе заряженных частиц пылевого аэрозоля

# Лабораторный стенд

Для решения задач, связанных с разработкой методов и приборов для изучения процессов в ветропесчаном потоке

# Классический механизм сальтации

- 1. Отрыв песчаных частиц от ПП аэродинамической подъемной силой
- 2. Ускорение сальтирующих частиц ветровым потоком
- 3. Отскоки от подстилающей поверхности
- 4. Выбивание новых частиц с подстилающей поверхности

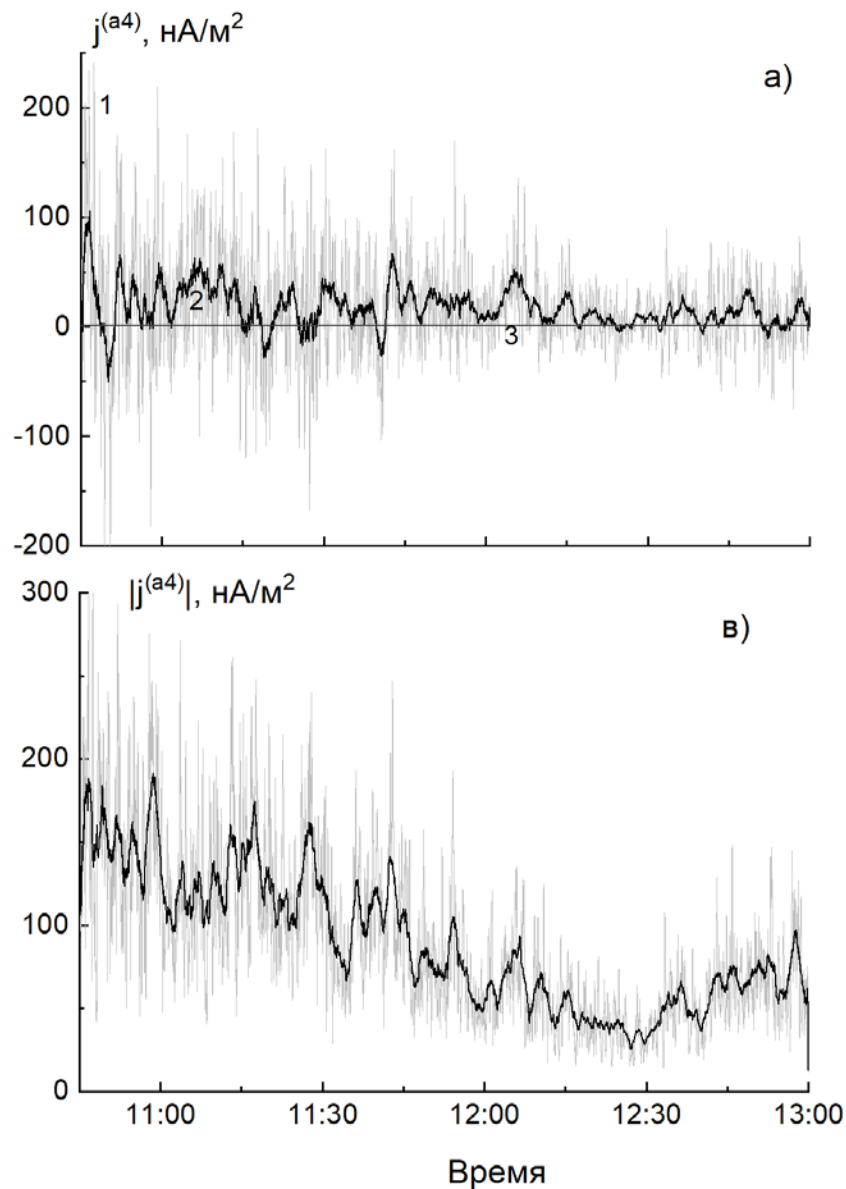
# Электризация частиц МПА

- ВМПА заряжены, что трудно объяснить в рамках концепции классической сальтации. Нами выполнены измерения плотности электрических токов, обусловленных переносом заряженных частиц МПА.ажно, отметить, что на ОТ частицы

# Ветропесчаный поток - пылевая плазма

- ВПП отличается аномально высокой электризацией
- В ВПП сильно наэлектризованы сальтирующие частицы
- Заряжена подстилающая поверхность
- Заряжены частицы МПА
- В ВПП происходят электрические (коронные) разряды

# Плотность электрических токов



# Плотность электрических токов

- Эти токи обусловлены переносом заряженных частиц пылевого аэрозоля

# Статистические характеристики вариаций плотности и модулей токов (нА/м<sup>2</sup>), обусловленных переносом заряженных частиц пылевого аэрозоля

| Стат.хар.  | $j_{10}^{(a4)}$ | $j_{100}^{(a4)}$ | $j_{10}^{(a12)}$ | $j_{100}^{(a12)}$ | $ j_{10}^{(a4)} $ | $ j_{100}^{(a4)} $ | $ j_{10}^{(a12)} $ | $ j_{100}^{(a12)} $ |
|------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| Средн.     | 17.5            | 17.5             | 14               | 14                | 90                | 90                 | 52                 | 52                  |
| СКО        | 42              | 18               | 27               | 12.7              | 49                | 39                 | 25                 | 18                  |
| Коеф. вар. | 2.39            | 1.03             | 1.92             | 0.91              | 0.55              | 0.44               | 0.48               | 0.35                |
| Асим.      | 0.35            | 0.61             | 1.31             | 1.48              | 0.99              | 0.44               | 1.44               | 0.76                |
| Эксцесс    | 3.19            | 1.86             | 3.77             | 3.34              | 0.68              | -0.87              | 4.21               | 1.74                |

# Средние плотности и средние модули плотности

- Средние модули плотности больше, чем средние значения плотности, т.к. токи знакопеременные

# Электродинамическая сальтация

- Нами обнаружен новый механизм сальтации при электрических (коронных) разрядах на подстилающей поверхности. Показано, что при электродинамической сальтации могут возникать высокоскоростные сальтирующие частицы (больше примерно 1 м/с).

# Количественные характеристики

- Независимо от механизма сальтации необходимо иметь возможность количественной характеристики эмиссии МПА

# Количественные характеристики эмиссии МПА

Количественными характеристиками эмиссии МПА могут служить вертикальные турбулентные потоки пылевого аэрозоля, которые мы определяем по данным измерений флуктуаций концентраций частиц МПА и вертикальной компоненты скорости ветра.

# Турбулентный поток аэрозоля

$$F(\tau) = \tau^{-1} \int_0^{\tau} g(t) dt = \tau^{-1} \int_0^{\tau} N'(t) w'(t) dt$$

# Корреляционный метод

- Вертикальные турбулентные потоки МПА мы измеряем корреляционным методом
- Первые результаты измерений ВТПА были опубликованы в 2002 г.
- В 2021-2022 гг. были опубликованы результаты измерений ВТПА в условиях квазинепрерывной сальтации/эмиссии

# Скорость выноса аэрозоля

$$W_N = \frac{F}{\overline{N}},$$

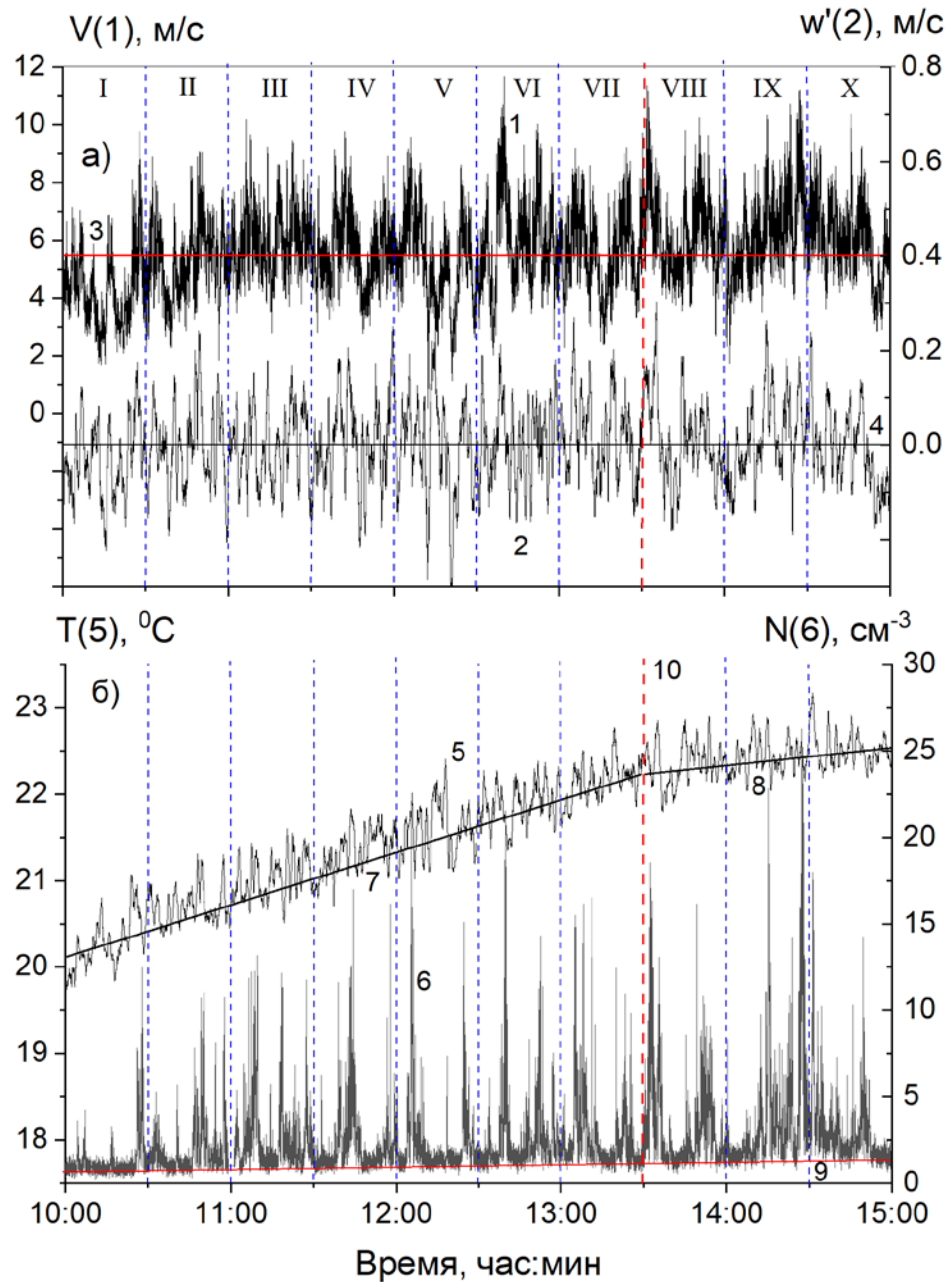
# Режимы эмиссии МПА

В докладе представлены результаты измерений ВТПА на ОТ при всплесковой (перемежающейся) эмиссии МПА

# Результаты измерения флуктуаций

- В условиях всплесковой эмиссии МПА на ОТ в Астраханской обл. были выполнены измерения 09.09.2021 ( $z = 3\text{м}$ ) флуктуаций
- концентрации частиц МПА  $N(t)$ , горизонтальной  $V(t)$  и вертикальной  $W(t)$  компонент скорости ветра и температуры воздуха  $T(t)$

# Всплесковая эмиссия МПА



# Характер изменчивости

Особенностью вариаций  $V(t)$  была сильная низкочастотная изменчивость (периоды с длительностью 3-10 минут), что привело к низкочастотной перемежаемости  $N(t)$

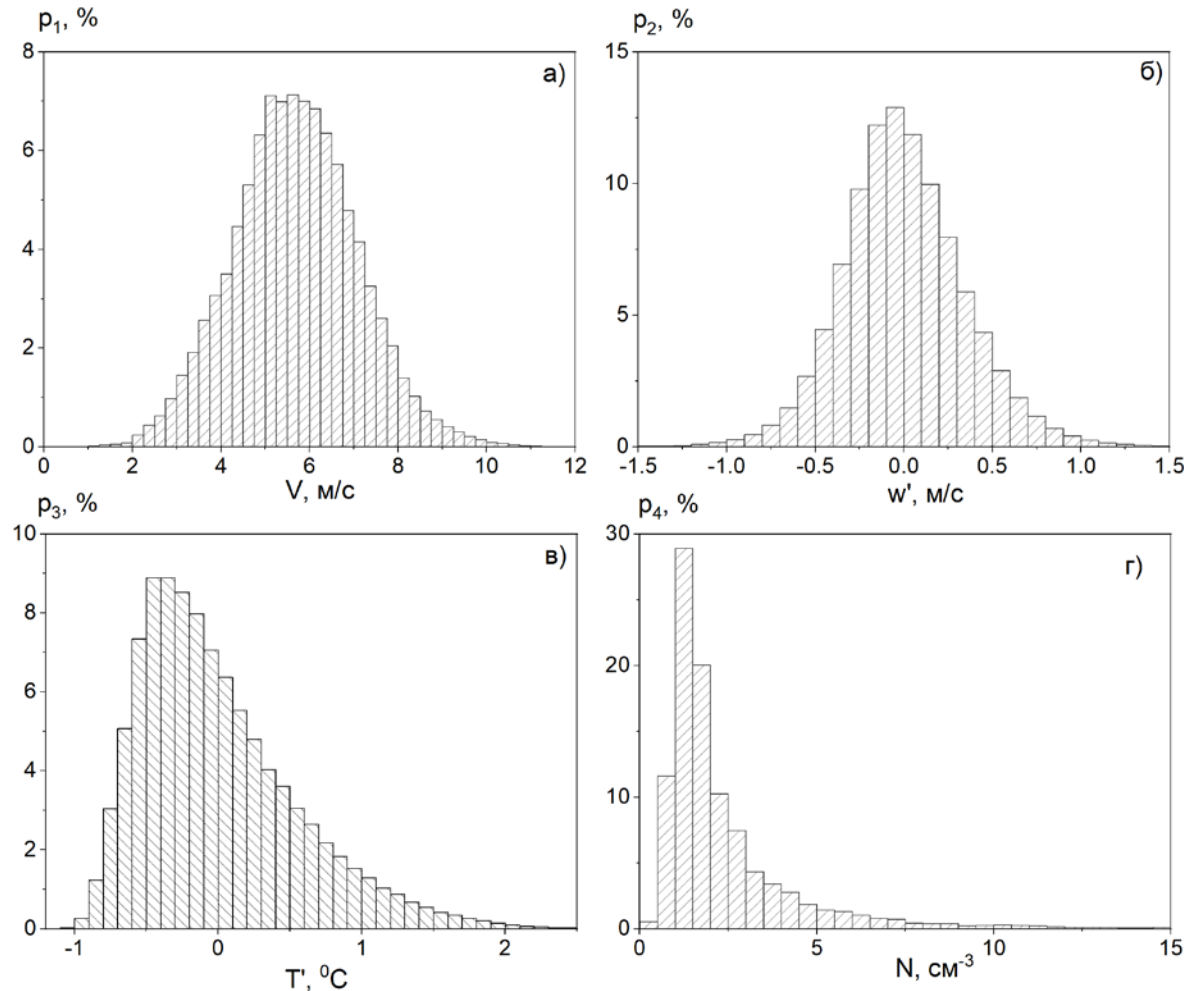
# Статистические характеристики

| Стат. характ. | V, м/с |       | w', м/с |       | T', °C |       | N, см <sup>-3</sup> |       |
|---------------|--------|-------|---------|-------|--------|-------|---------------------|-------|
| Время оср., с | 0.09   | 60    | 0.09    | 60    | 0.09   | 60    | 1.0                 | 60    |
| Средние       | 5.70   | 5.70  | 0.0     | 0.0   | 0.0    | 0.0   | 2.44                | 2.44  |
| Станд. откл.  | 1.40   | 1.18  | 0.35    | 0.08  | 0.55   | 0.30  | 2.22                | 1.71  |
| Макс. знач.   | 11.7   | 9.36  | 2.9     | 0.21  | 3.2    | 0.50  | 26.3                | 14.73 |
| Мин. знач.    | 0.2    | 2.46  | -2.13   | -0.23 | -1.33  | -0.52 | 0.2                 | 0.80  |
| Коэфф. вар.   | 0.25   | 0.21  | -       | -     | -      | -     | 0.91                | 0.70  |
| Асимметрия    | 0.13   | -0.11 | 0.24    | 0.1   | 1.05   | 0.07  | 3.40                | 2.86  |
| Эксцесс       | 0.09   | 0.15  | 1.06    | -0.06 | 1.15   | -0.38 | 16.3                | 12.3  |

# Эмпирические функции распределения

- Горизонтальная компонента скорости ветра  $V$  распределена по закону близкому к нормальному
- Заметные отклонения наблюдаются у  $T'(t)$
- Наибольшие отклонения имеют место для концентрации частиц пылевого аэрозоля  $N$

# Эмпирические функции распределения



Эмпирические функции распределения горизонтальной (а) и вертикальной (б) компонент скорости ветра, флуктуаций температуры воздуха (в) и концентрации частиц пылевого аэрозоля (г).

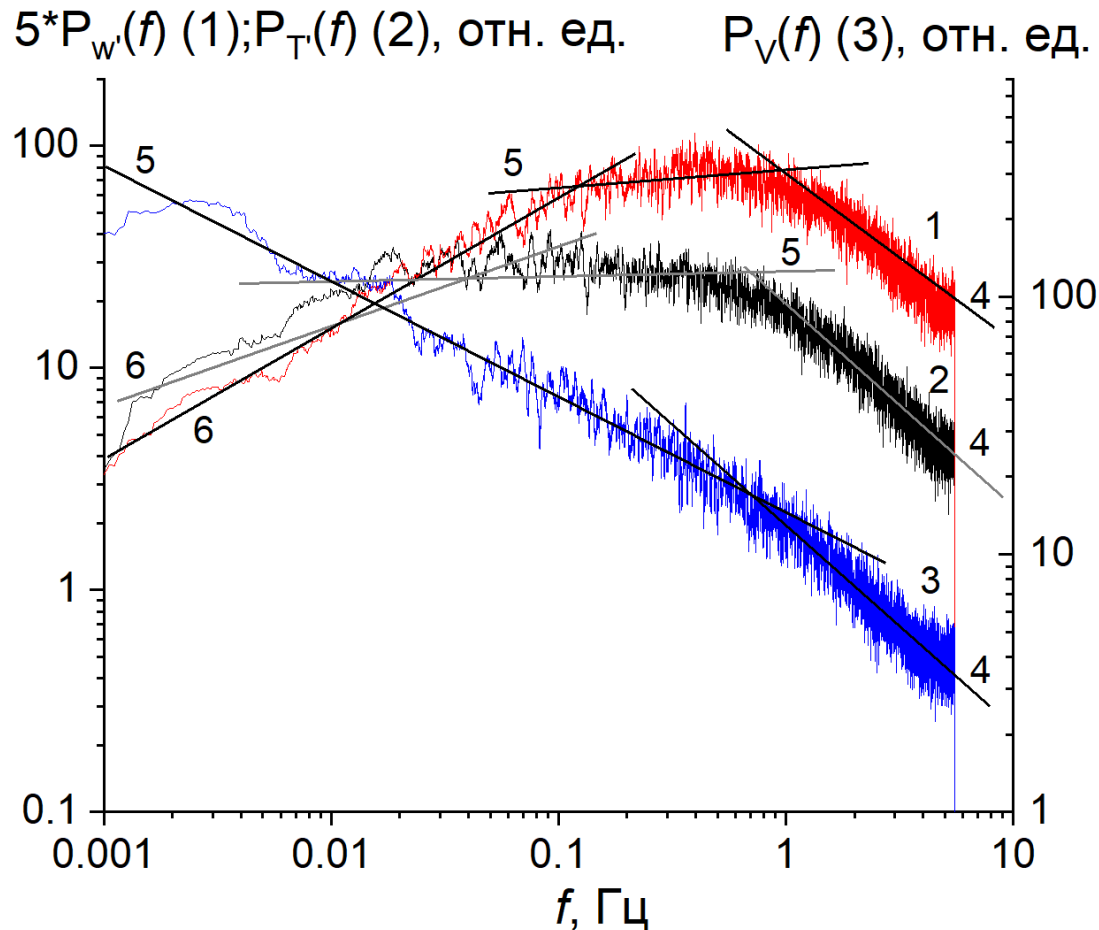
# Спектры флуктуации

- Рассчитаны спектры мощности флуктуаций (S - спектральная плотность мощности

$$P(f) = fS'(f)$$

- Спектры флуктуаций  $W(t)$  и  $T(t)$  существенно отличаются от спектра  $V(t)$
- В спектре  $V(t)$  сильно выражены низкочастотные вариации

# Спектры флуктуаций



Спектры флуктуаций вертикальной компоненты скорости ветра (1), температуры воздуха (2) и горизонтальной компоненты скорости ветра (3).

Обозначения: 4,5,6 – фрагменты кусочно-степенной аппроксимации спектров (4 – в области “высоких” частот, 6 – в области “низких” частот, 5 – в промежуточной области для температуры и вертикальной компоненты скорости ветра и в области  $f > 0.6$  Гц для горизонтальной компоненты).

# Параметры турбулентности

- Для 30-минутных интервалов были рассчитаны параметры турбулентности
- Динамическая скорость менялась в пределах 0.13-0.21 м/с
- Масштаб Монина-Обухова варьировал от -2 м до -9 м
- Поток тепла менялся – от 90 до 157 Вт/м<sup>2</sup>

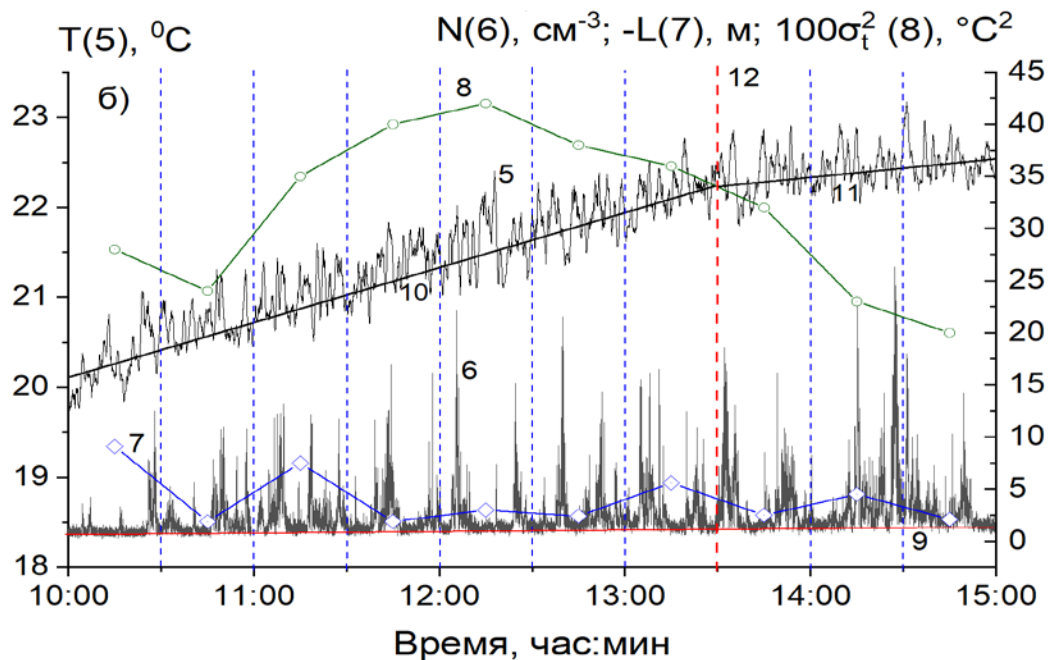
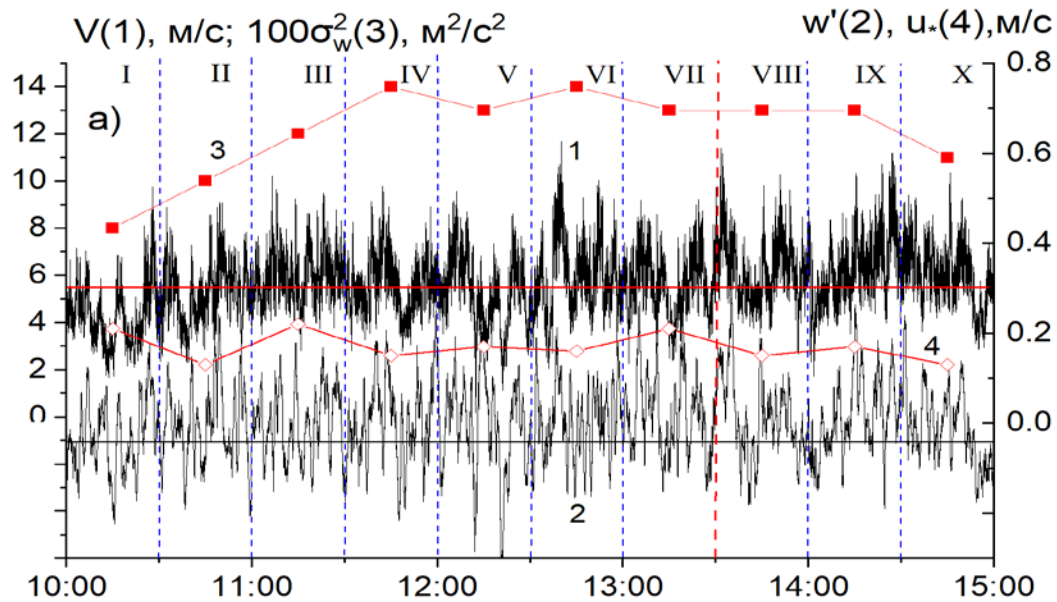
# Параметры турбулентности

| Интервалы<br>Параметры    | 10:00-<br>10:30 | 10:30-<br>11:00 | 11:00-<br>11:30 | 11:30-<br>12:00 | 12:00-<br>12:30 | 12:30-<br>13:00 | 13:00-<br>13:30 | 13:30-<br>14:00 | 14:00-<br>14:30 | 14:30-<br>15:00 | Сред. |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|
| $\sigma_1^2 (^\circ C)^2$ | 0.28            | 0.24            | 0.35            | 0.40            | 0.42            | 0.38            | 0.36            | 0.32            | 0.23            | 0.20            | 0.32  |
| $\sigma_w^2, m^2 / c^2$   | 0.08            | 0.10            | 0.12            | 0.14            | 0.13            | 0.14            | 0.13            | 0.13            | 0.13            | 0.11            | 0.11  |
| $\bar{N}, cm^{-3}$        | 0.45            | 0.85            | 1.13            | 0.93            | 0.88            | 1.21            | 1.14            | 1.76            | 2.21            | 1.32            | 1.19  |
| $\bar{V}, m / c$          | 4.37            | 5.28            | 6.03            | 5.59            | 5.27            | 5.99            | 5.66            | 6.29            | 6.32            | 6.06            | 5.69  |
| $u, m/c$                  | 0.21            | 0.13            | 0.22            | 0.15            | 0.17            | 0.16            | 0.21            | 0.15            | 0.17            | 0.13            | 0.17  |
| $L, m$                    | -9.1            | -1.9            | -7.5            | -1.9            | -3.0            | -2.4            | -5.6            | -2.5            | -4.5            | -2.1            | -4.1  |
| $Q, Bm/m^2$               | 90              | 100             | 134             | 157             | 158             | 151             | 150             | 128             | 107             | 90              | 126   |
| $W_H, cm/c$               | 14              | 17              | 18.5            | 20.5            | 20              | 20              | 21              | 18.5            | 18              | 16.5            | 18.4  |
| $F, cm^{-2}c^{-1}$        | 7.2             | 12              | 11.5            | 17.0            | 14              | 17              | 18.5            | 19              | 27.5            | 15              | 15.9  |
| $W_N, cm/c$               | 16              | 15              | 10              | 18              | 16              | 14              | 16              | 11              | 12.5            | 11              | 13.9  |

# Параметры турбулентности

Сопоставленные с данными измерений  
флуктуаций (рисунок)

# Временная изменчивость



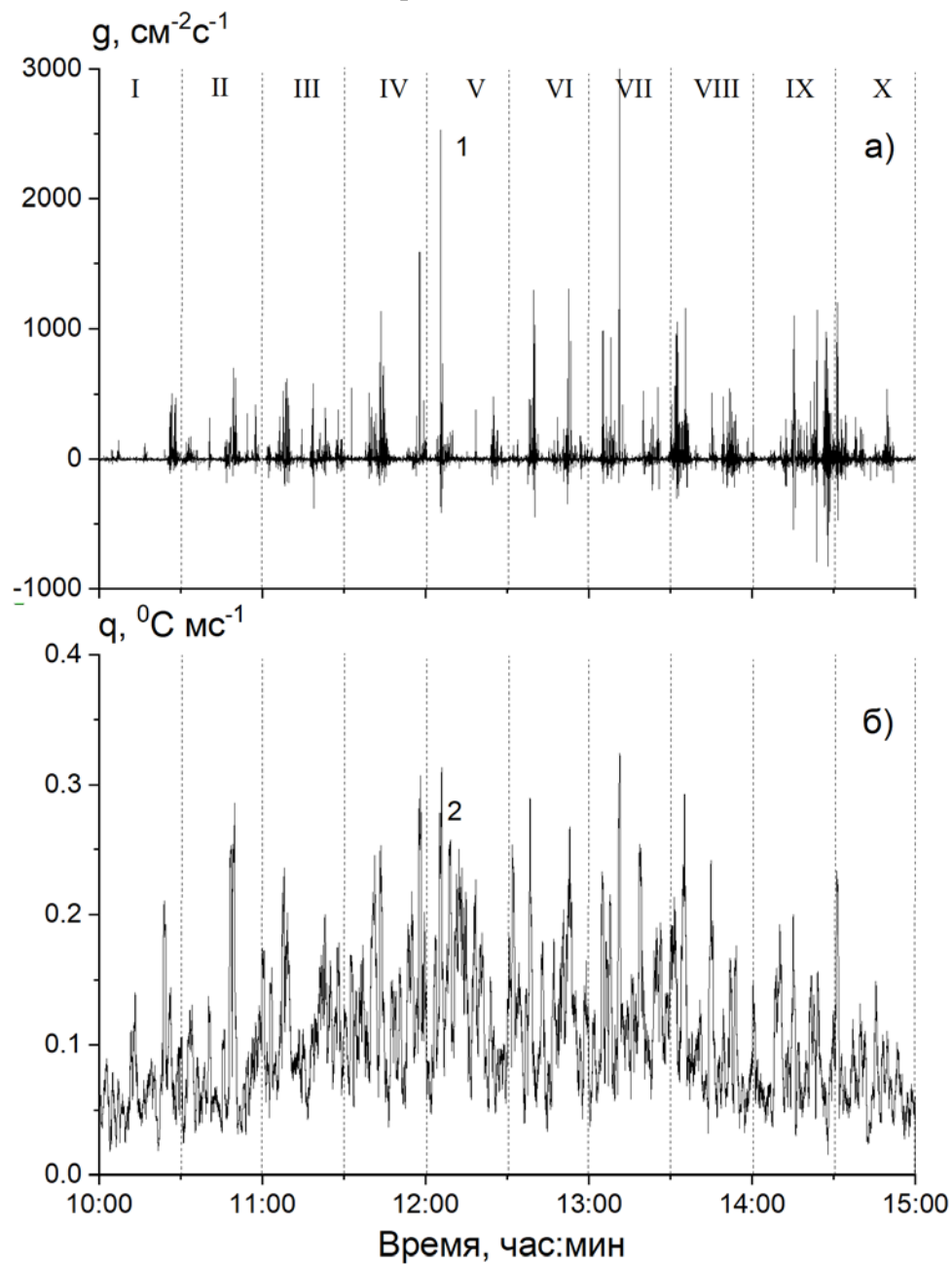
# Потоки аэрозоля и тепла

- Проанализирована изменчивость потоков аэрозоля и потоков тепла в условиях всплесковой эмиссии МПА

# Поток тепла

$$Q = \frac{\rho c_p}{\tau} \int_0^{\tau} q(t) dt,$$

# Потоки аэрозоля и тепла



# Потоки аэрозоля и тепла

- Нетрудно видеть, что плотность аэрозоля отличается низкочастотной перемежаемостью, которая обусловлена вариациями  $N(t)$
- У потока тепла низкочастотная перемежаемость отсутствует!

# Поток аэрозоля

- В целом вариации плотности турбулентного потока пылевого аэрозоля определяются суперпозицией конвективных движений разных масштабов присущих вариациям  $N(t)$  и  $W(t)$

# Нормированные потоки аэрозоля

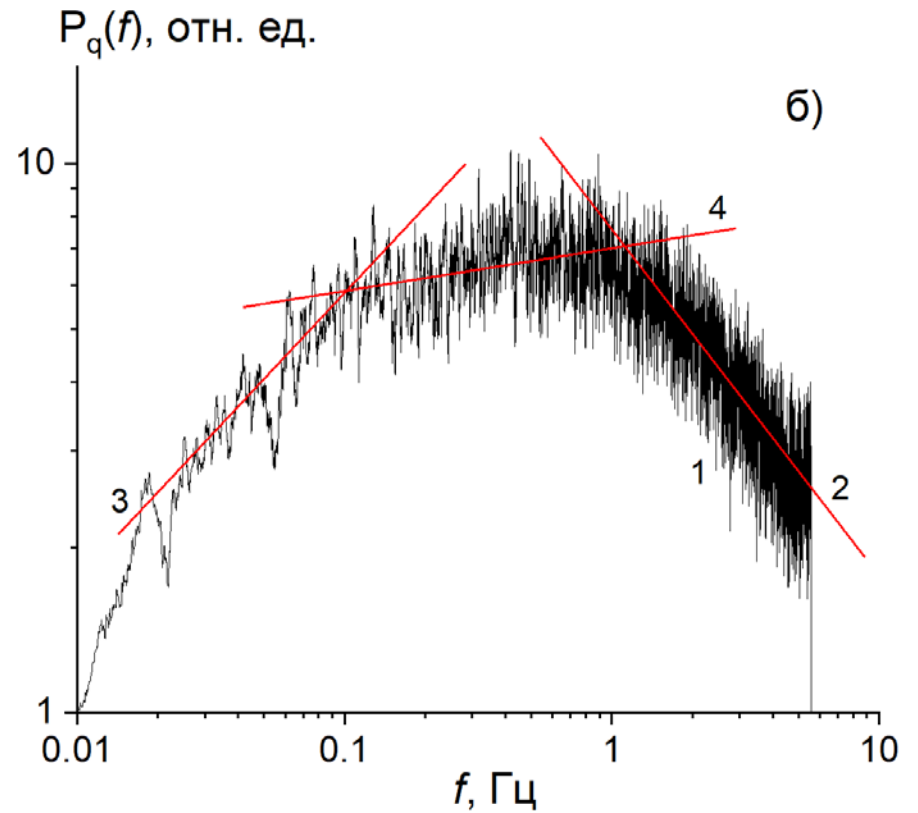
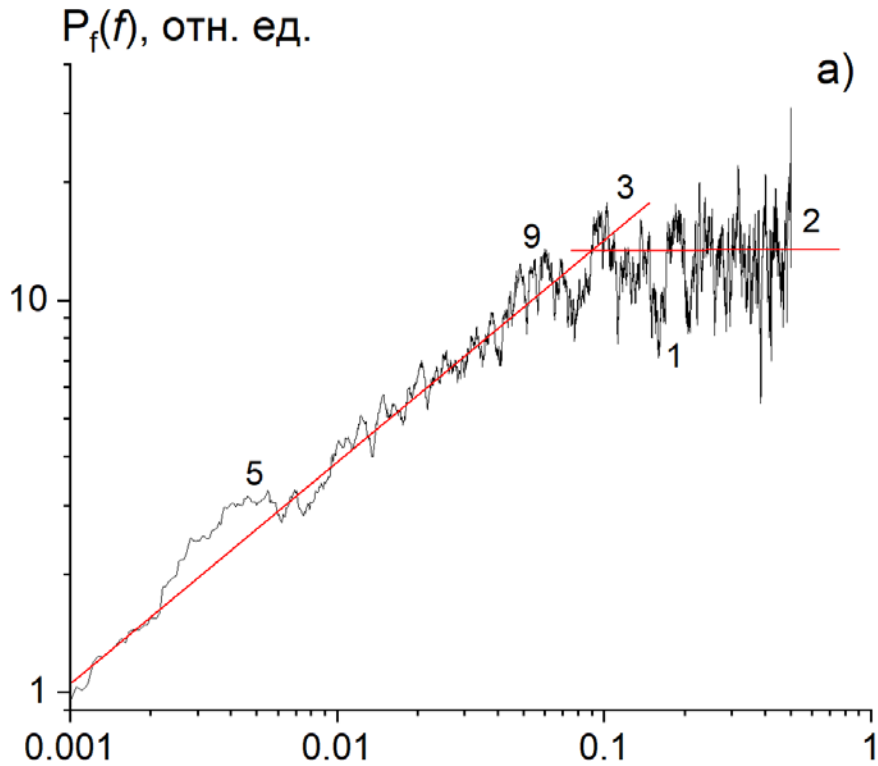
- Были рассчитаны для 30-минутных интервалов нормированные турбулентные потоки или скорости выноса аэрозоля и тепла

# Скорости выноса

Поток аэрозоля – от 10 до 18 см/с

Поток тепла – от 14 до 21 см/с

# Спектры потоков



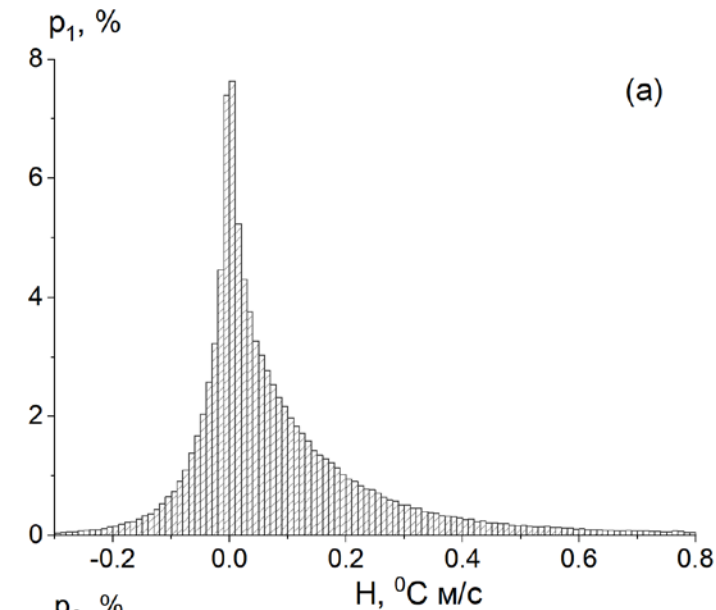
# Спектры потоков

- Основной вклад в спектральную плотность мощности  $P(f)$  вносит диапазон 0.05-5.0 Гц

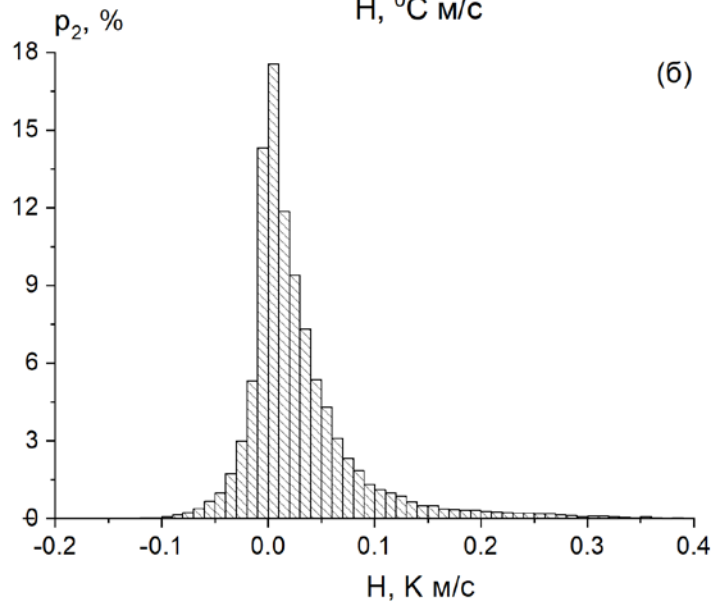
# Эмпирические функции распределения

- Представляют интерес эмпирические функции распределения для потока тепла

# Эмпирические функции распределения



(a)



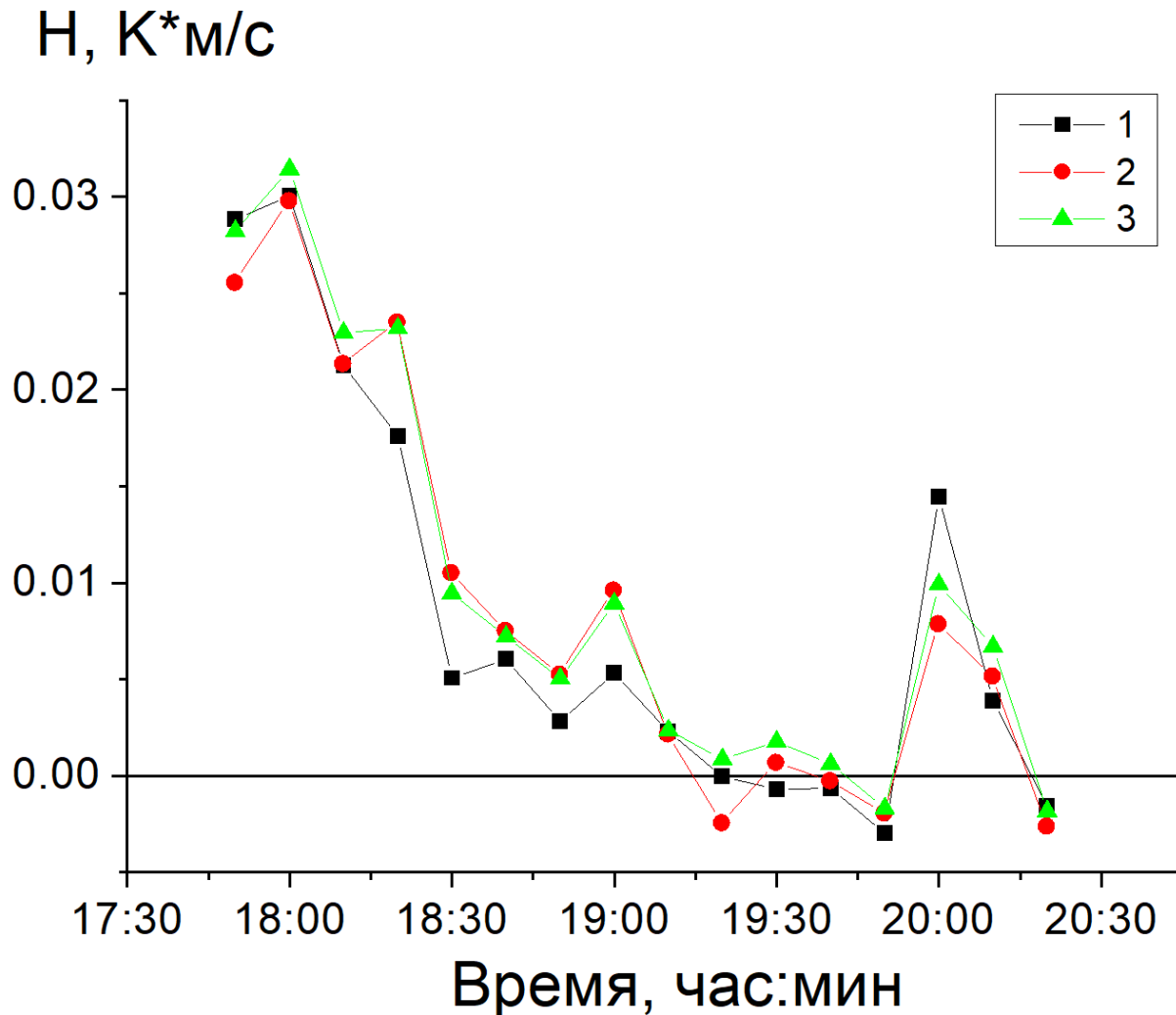
(б)

Эмпирические функции распределения плотности потока температуры по данным измерений в 2021 г. с временным разрешением 0.09 с (а) и в 2010 г. с временным разрешением 0.02 с (б).

# Сравнение данных измерений

Показано, что результаты измерений с помощью трёх акустических метеостанций удовлетворительно согласуются друг с другом

# Временная изменчивость



Временная изменчивость турбулентного потока температуры 17.08.2010 по данным синхронных измерений с помощью акустических метеостанций Метео-2 (1 и 2) и метеостанции Metek (3).

## Доклад в четверг

- Доклад А.В. Карпова о результатах исследований потоков пылевого аэрозоля и сравнении методов его измерений

# Пыльная мгла

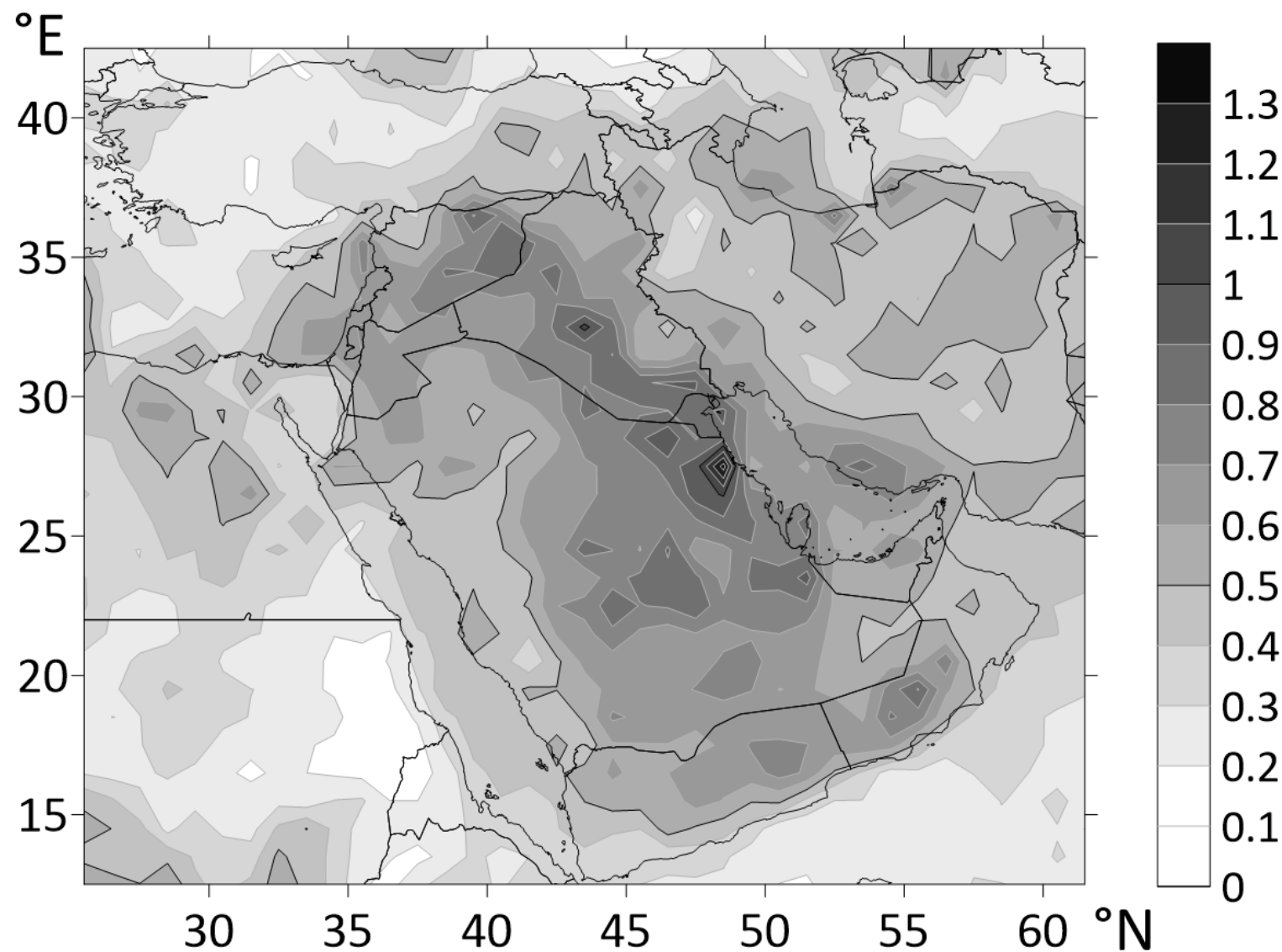
- Одним из последствий эмиссии МПА на ОТ является крупномасштабная пыльная мгла

# Пыльная мгла

- У нас представлен на эту конференцию стендовый доклад

О.И. Даценко и др. о пыльной мгле на Ближнем Востоке

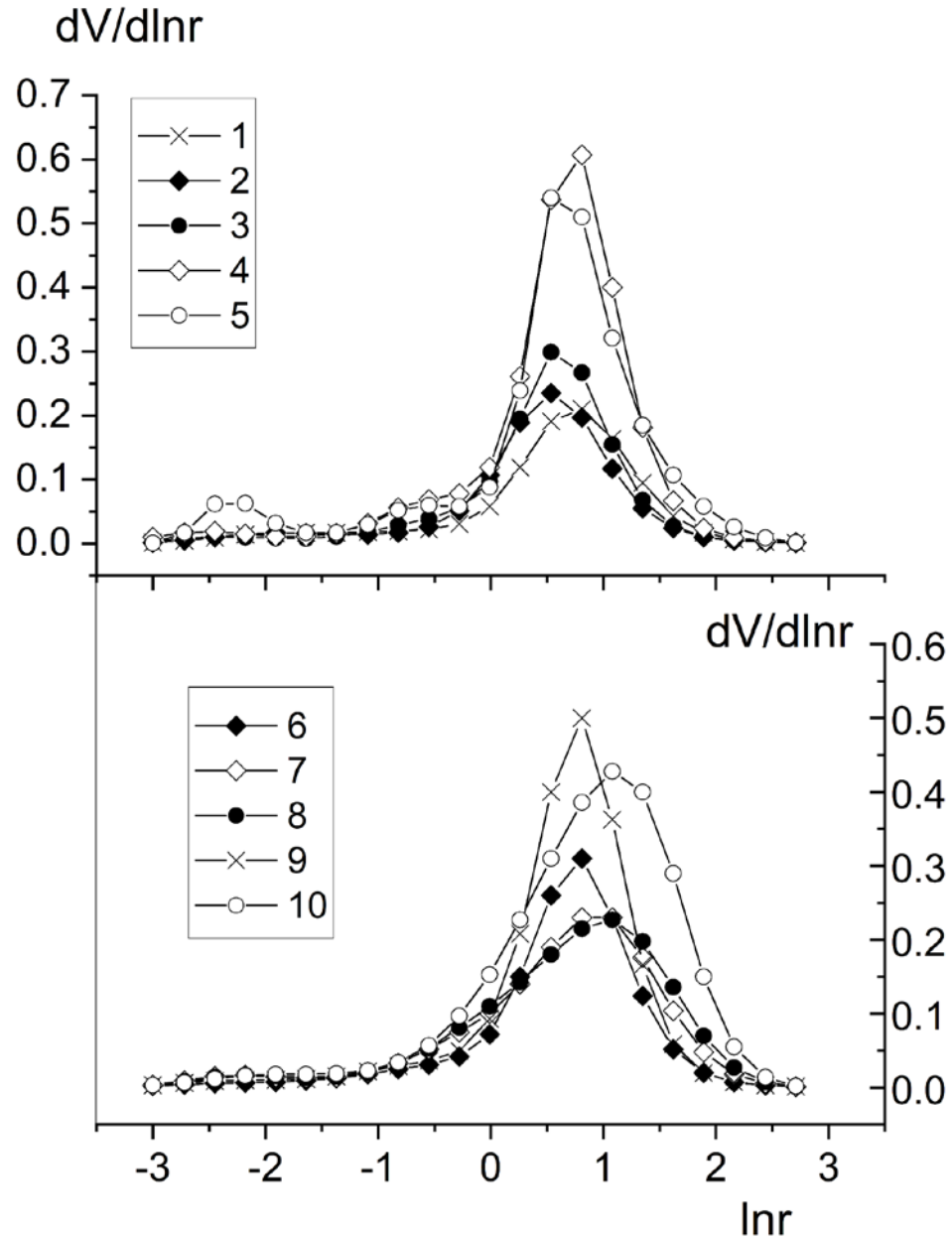
# Пыльная мгла на Ближнем Востоке



# Микроструктура пылевого аэрозоля

- Проанализированы вариации функции распределения частиц пылевого аэрозоля в пыльным мгле.
- В этом распределении доминирует фракция грубодисперсного аэрозоля

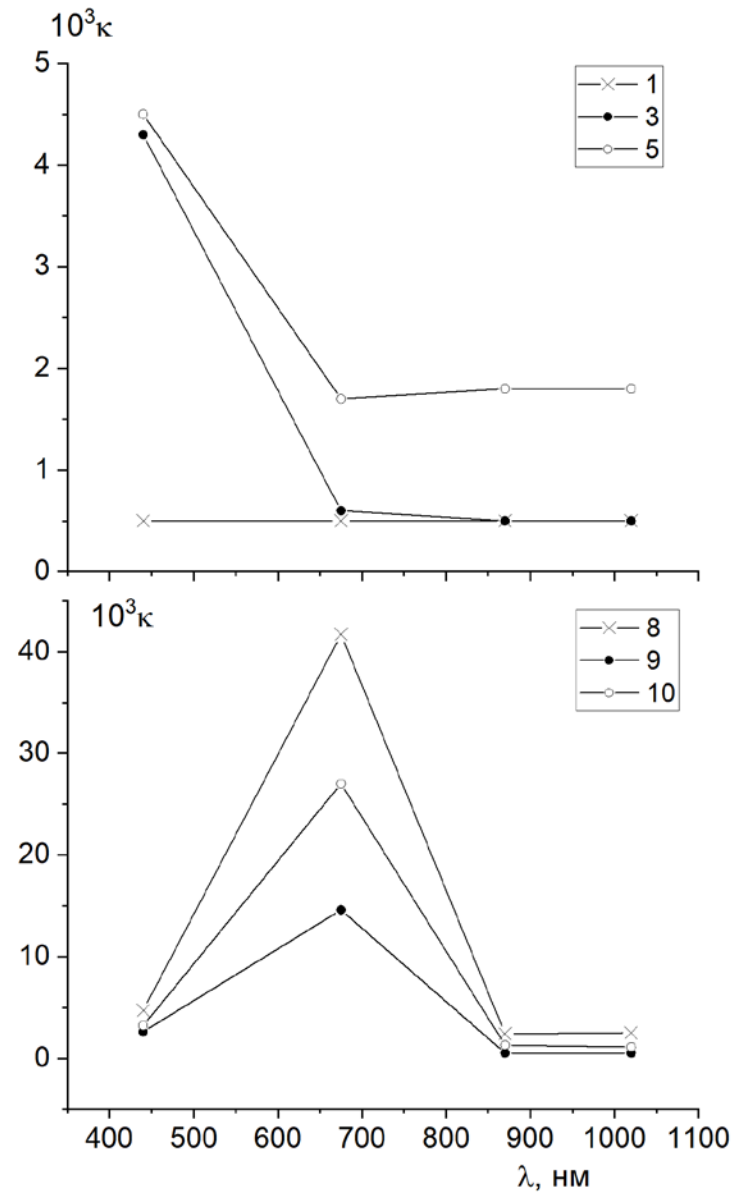
# Микроструктура пылевого аэрозоля



# Оптические и микрофизические характеристики

Проанализированы вариации мнимой части  
коэффициента преломления, альbedo  
однократного рассеяния, аэрозольная  
оптическая толщина поглощения

# Мнимая часть коэффициента преломления



# Селективное поглощение МПА

- Нами обнаружено селективное поглощение пылевого аэрозоля на длине волны 675 нм, которое согласно современным исследованиям (С. Лафон, И. Соколик и др.) обусловлено присутствием в частицах пылевого аэрозоля минерала гётит, содержащим оксид железа

Спасибо за внимание!