

# Несальтационная эмиссия аэрозоля: параметризация и моделирование

Н.В. Вазаева, О.Г. Чхетиани

CITES-2021

22-26 ноября 2021, Москва

# План

- Мотивация, обратные траектории
- Описание экспедиций, метеоусловий
- Массовые концентрации и потоки частиц
- Аэрозольные слои. Результаты моделирования. Учет несальтационной эмиссии
- Заключение

# Мотивация. Экологическая проблема

- Минеральный аэрозоль - самый распространенный среди различных видов аэрозолей. На его долю приходится **более половины** общемирового количества аэрозолей. В аридных зонах **увеличивается степень воздействия приземного аэрозоля на геохимические, экологические и радиационно-климатические** процессы. Минеральные частицы, выбрасываемые, в частности, из-за пыльных бурь, могут переноситься горизонтально на большие расстояния. Это приводит к **деградации земель** из-за изменений структуры и состава почв как у источников пыли, так и у рецепторов пыли, а также к **изменениям в биогеохимических циклах** над сушей и океаном, к потерям коммунальных услуг из-за **снижения видимости и загрязнения воздуха**, и даже к **глобальным изменениям окружающей среды и климата** из-за **прямого влияния аэрозоля на потоки излучения, образование облаков, растительность, альбедо ледников и снежного покрова и атмосферное электричество**. Многие были достигнуты с тех пор, как **Багнольд опубликовал свою работу** «The Physics of Blown Sand and Desert Dunes» в 1941 г. Однако **характеристики, определяющие количество выбрасываемой пыли, еще полностью не изучены** из-за сложностей учета **химического состава и физических механизмов подъема и взаимодействия, сложности наблюдения и недостатка инструментов прогнозирования и мониторинга** в различных пространственно-временных масштабах.

# Мотивация. Недостаток данных для определения полуэмпирических коэффициентов для моделирования

- В целом, **математическое моделирование** в соответствии с **конкретными полевыми измерениями** предоставляет (в лучшем случае) **полуэмпирические формулы для конкретных регионов при определенных погодных условиях**. Ожидается, что эмпирические коэффициенты, используемые в таких моделях, будут **зависеть от типа почвы, дисперсного состава (PSD) выбрасываемой пыли и погодных условий**. Однако определить эти коэффициенты экспериментально или теоретически сложно. **Самый надежный способ - использовать массивы данных экспериментальных наблюдений в различных условиях**. Известно, что подъем, перенос и осаждение пыли регулируются **четырьмя** основными факторами:

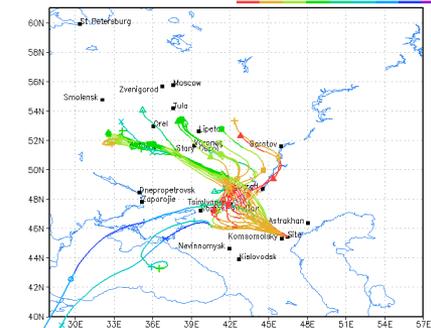
- 1) атмосферными условиями (ветер, осадки, стратификация и т. д.),
- 2) состоянием почвы (состав, текстура и т.д.),
- 3) характеристиками поверхности земли (топография, влажность почвы, растительность и незэрозионные элементы, шероховатость поверхности и т. д.),
- 4) практика управления земельными ресурсами (земледелие, выпас скота, добыча полезных ископаемых и т. д.).

# Мотивация. Большая доля мелких частиц в АПС

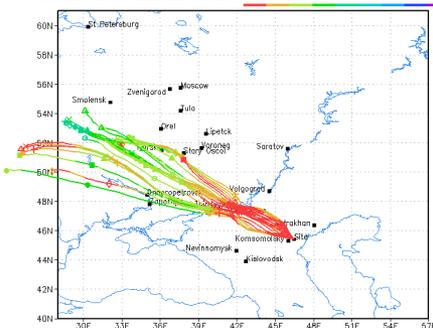
- **Современные модели** основаны на **сальтационной бомбардировке** как основном механизме образования пыли и аэрозолей. Тем не менее, измерения PSD переносимой по воздуху пыли Rosenberg et al. и измерения концентрации в воздухе Горчакова и др. показали **большую долю мелких частиц, чем если бы они были образованы только сальтацией**. Измерения в пустынях однозначно подтверждают наличие минеральной пыли в АПС в безветренных и слабоветренных условиях, **недостаточных** для инициирования механизма сальтации.
- Khalfallah et al. в своем исследовании **обнаружили эмпирическую корреляцию между этой PSD и термической структурой поверхности АПС**. **Массовые концентрации** мелкодисперсного аэрозоля, полученные для параметров гидродинамики **в вязком тепловом пограничном слое у поверхности земли, связаны с перепадом температуры в тепловом слое на поверхности и со значениями скорости трения** - так называемой **несальтационной эмиссией**. Для достаточно крупных частиц широко распространена модель конвективного турбулентного выброса пыли. Для мелких частиц (PM<sub>1,5</sub> / PM<sub>2,0</sub>) авторам удалось использовать несальтационную модель. Подробное исследование PSD в этой области было проведено авторами ранее.

# Обратные траектории. Например, жаркое засушливое лето 2020 года привело к усилению эмиссии аэрозоля и формированию сильной пыльной бури осенью 2020 года (которая достигла даже Атлантики)

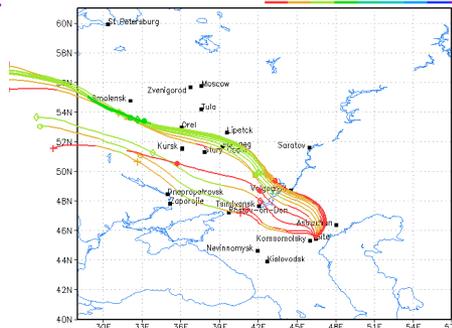
Back Trajectories Duration 72h ending 250m agl  
From 21.07.2020 17:00 UTC to 22.07.2020 17:00 UTC



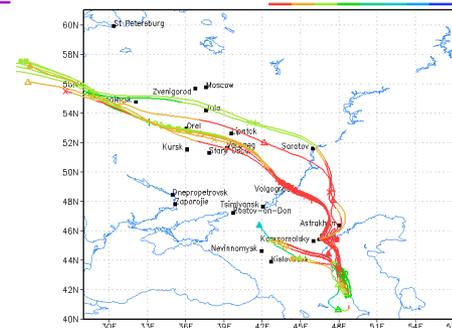
Back Trajectories Duration 72h ending 250m agl  
From 22.07.2020 17:00 UTC to 23.07.2020 17:00 UTC



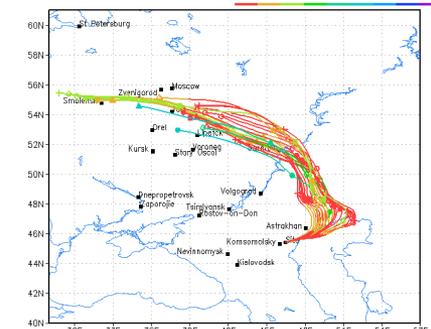
Back Trajectories Duration 72h ending 250m agl  
From 23.07.2020 17:00 UTC to 24.07.2020 4:00 UTC



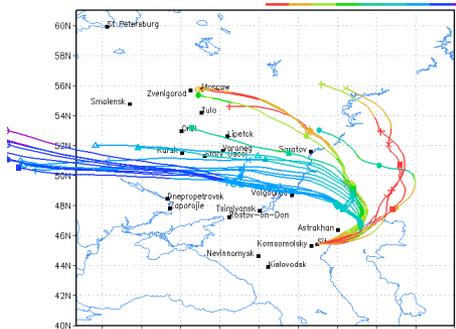
Back Trajectories Duration 72h ending 250m agl  
From 24.07.2020 4:00 UTC to 25.07.2020 4:00 UTC



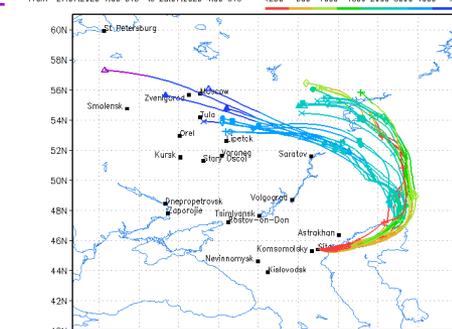
Back Trajectories Duration 72h ending 250m agl  
From 25.07.2020 4:00 UTC to 26.07.2020 4:00 UTC



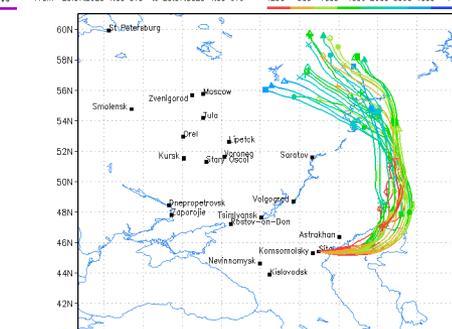
Back Trajectories Duration 72h ending 250m agl  
From 26.07.2020 4:00 UTC to 27.07.2020 4:00 UTC



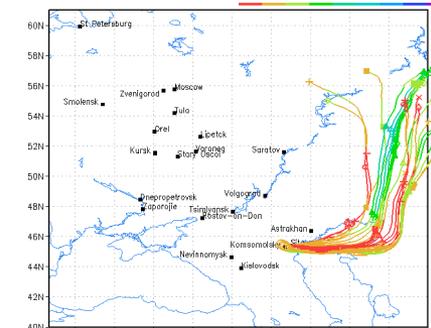
Back Trajectories Duration 72h ending 250m agl  
From 27.07.2020 4:00 UTC to 28.07.2020 4:00 UTC



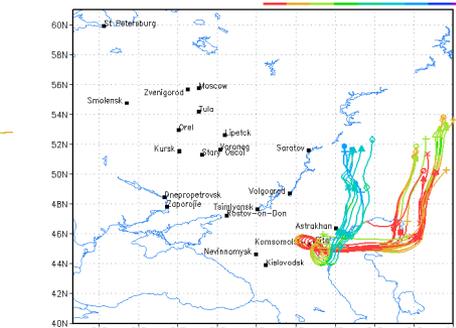
Back Trajectories Duration 72h ending 250m agl  
From 28.07.2020 4:00 UTC to 29.07.2020 4:00 UTC



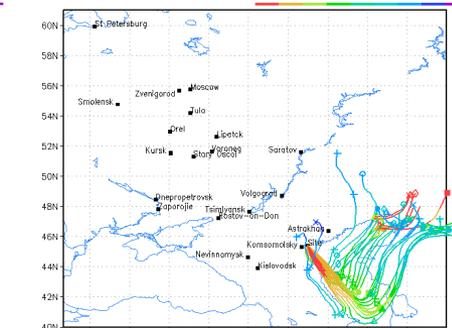
Back Trajectories Duration 72h ending 250m agl  
From 29.07.2020 4:00 UTC to 30.07.2020 4:00 UTC



Back Trajectories Duration 72h ending 250m agl  
From 30.07.2020 4:00 UTC to 31.07.2020 4:00 UTC



Back Trajectories Duration 72h ending 250m agl  
From 31.07.2020 4:00 UTC to 01.08.2020 4:00 UTC

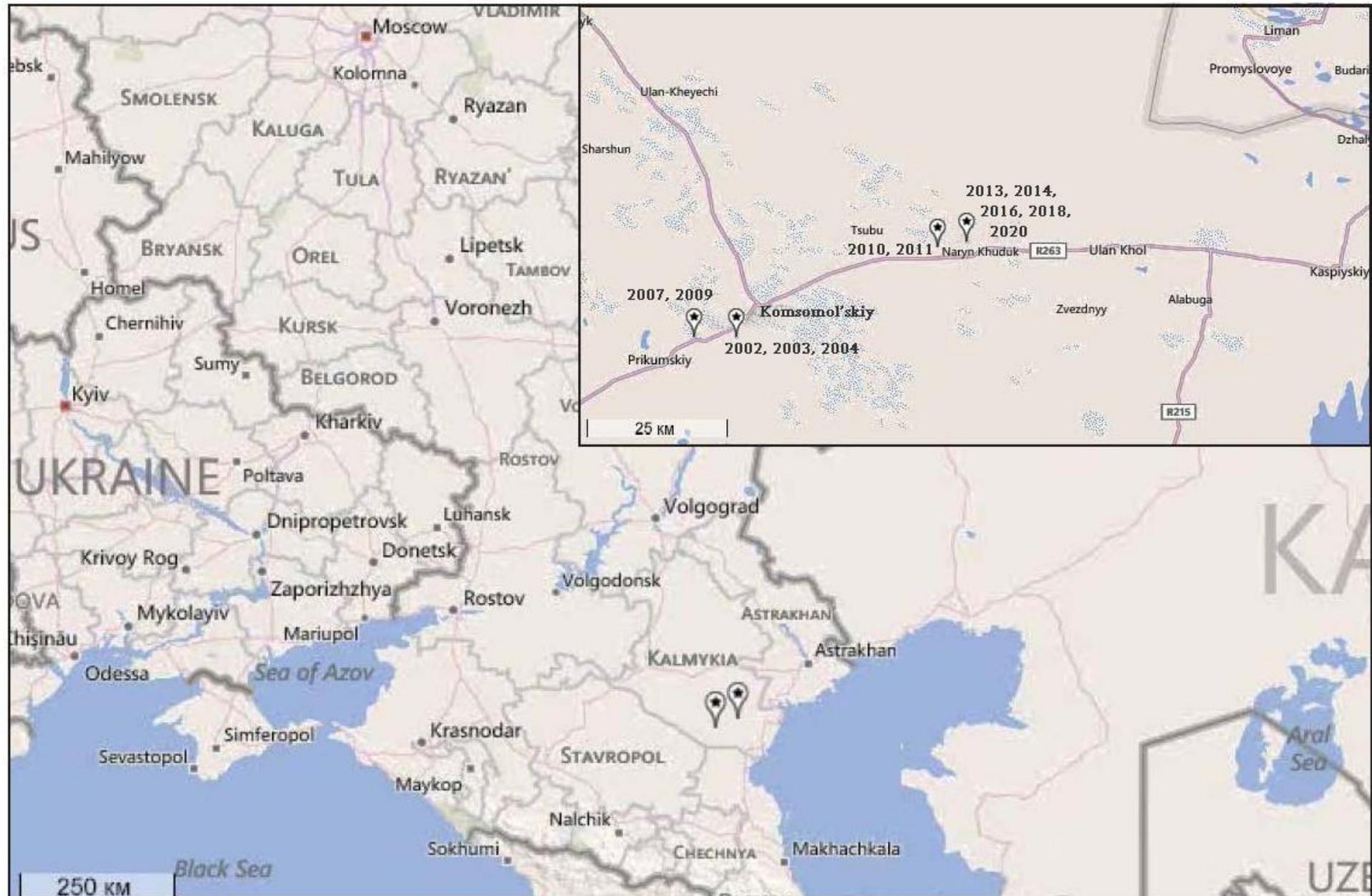


3-дневные обратные траектории частиц воздуха, рассчитанные, используя модель NOAA HYSPLIT для диапазона (а-к) от 21 до 31 июля

# Мотивация. Важность ежегодных экспедиций при недостаточном количестве метеорологических станций

- Данные о **долгосрочных рядах пыли** в основном поступают из **наблюдений о видимости земли на метеорологических станциях** и используются для исследования пыльных бурь и пространственно-временных характеристик распределения поднятого аэрозоля. Однако **данных одной только стационарной метеостанции часто недостаточно для математического моделирования выбросов пыли**; кроме того, во многих районах вообще нет метеорологических станций.
- В этом отношении **ежегодные экспедиции в пустынные и полупустынные зоны Прикаспийской низменности могут быть полезны** для прогресса в этой области. Пыльные бури представляют собой серьезную экологическую проблему в засушливых и полузасушливых регионах **Прикаспийской низменности**. Этот регион легко **подвергается эрозии из-за его подстилающей поверхности** (обычно в засушливых зонах) и **метеорологических особенностей** с типичным **ветром и температурным градиентом**, достаточно сильным, чтобы уносить частицы. Такие наборы экспериментальных данных также важны для **параметризации и верификации** различных результатов численного моделирования, в рамках этой конкретной области.

# Расположение





2009

2010

2011

# Метеоусловия

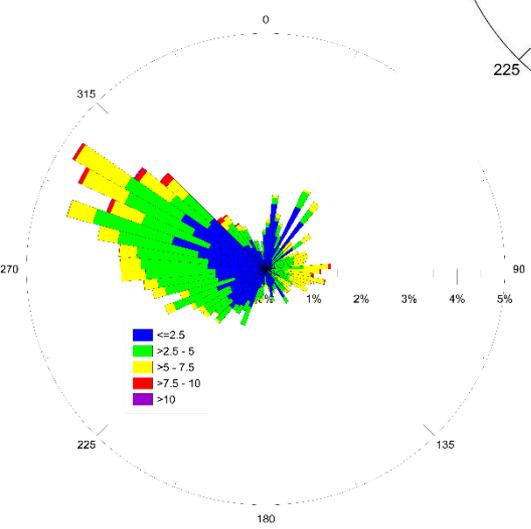
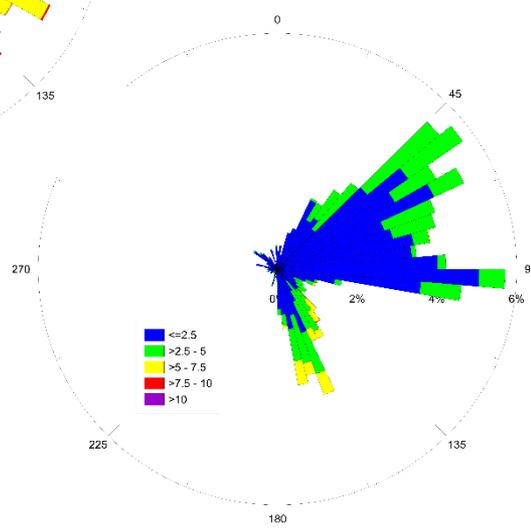
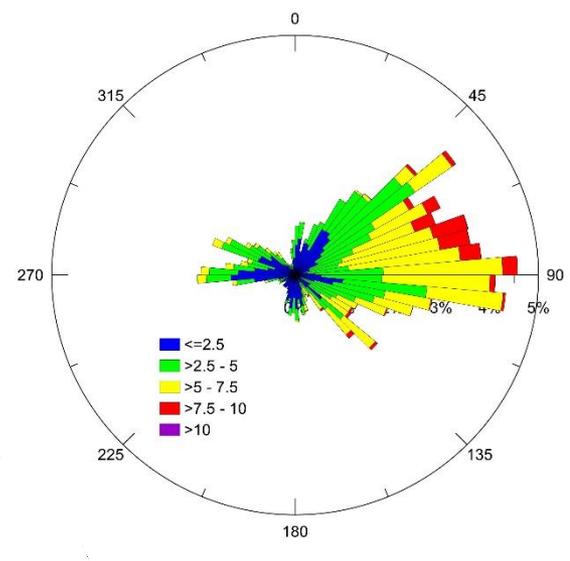
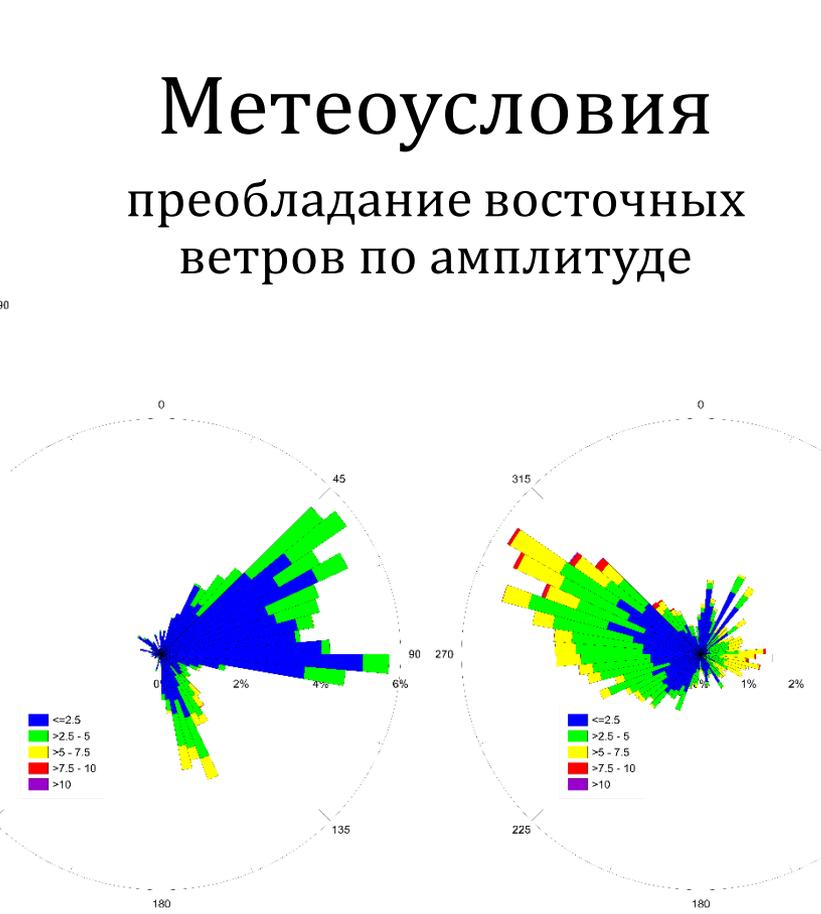
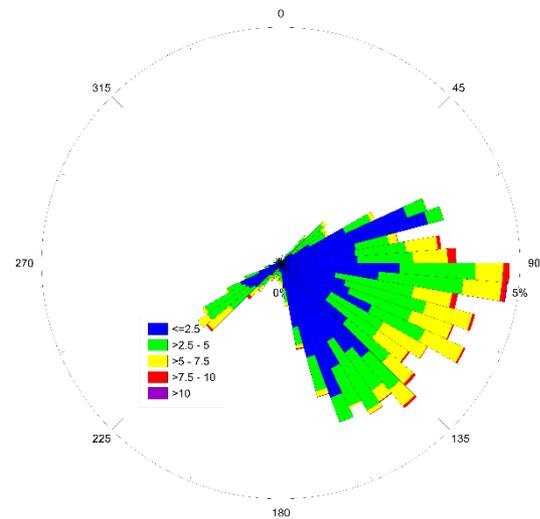
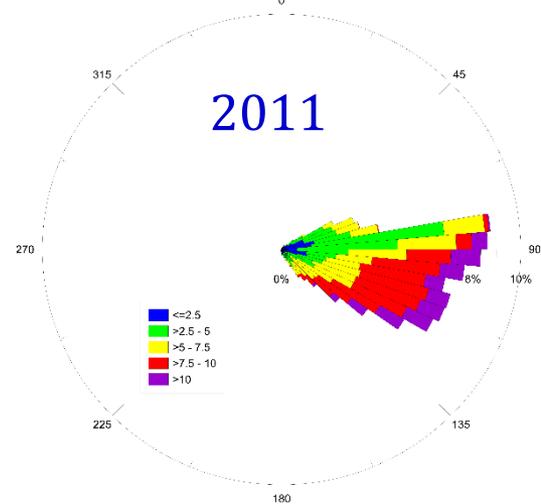
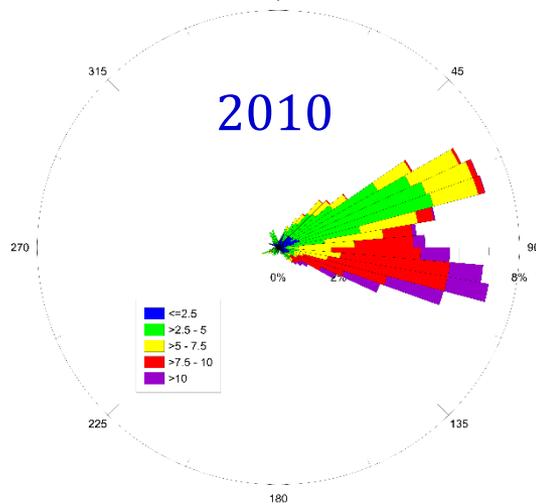
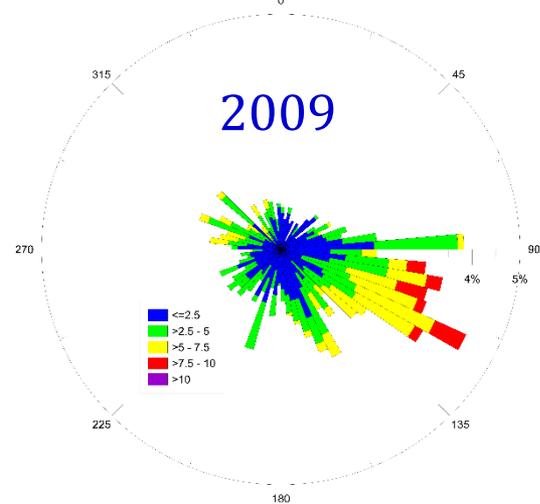
преобладание восточных  
ветров по амплитуде

2020

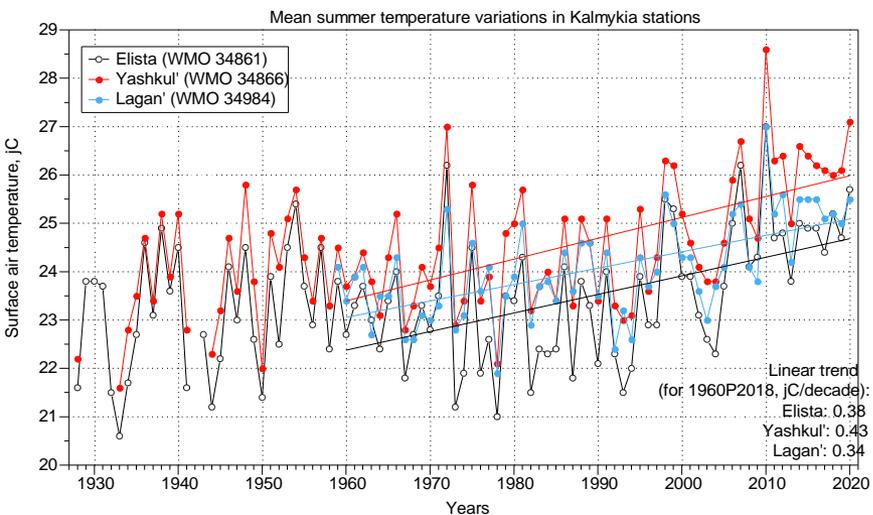
2013

2014

2016



# Метеоусловия



<http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных>

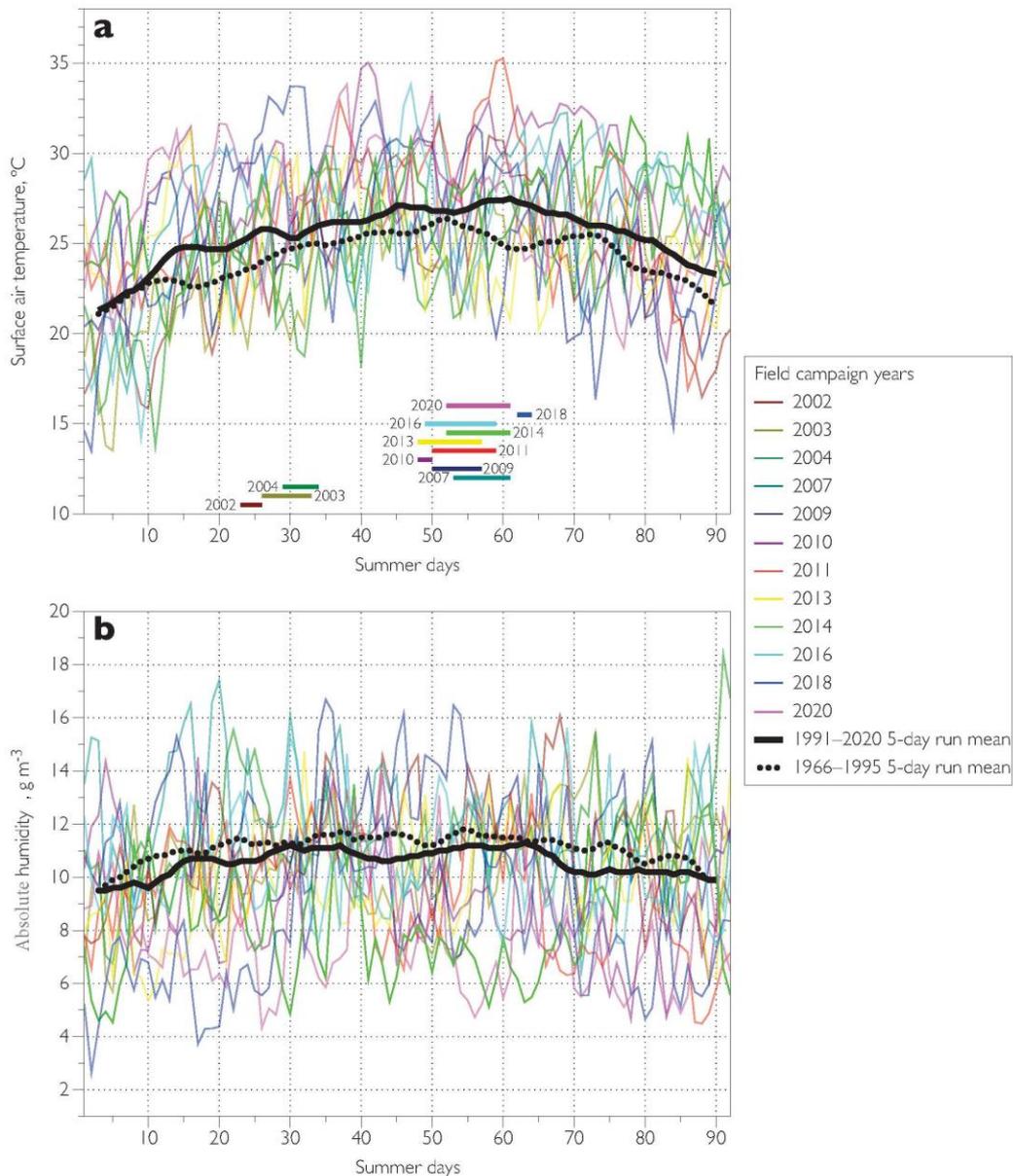
RIHMI-WDS.

[http://meteo.ru/english/climate/cl\\_data.php](http://meteo.ru/english/climate/cl_data.php)

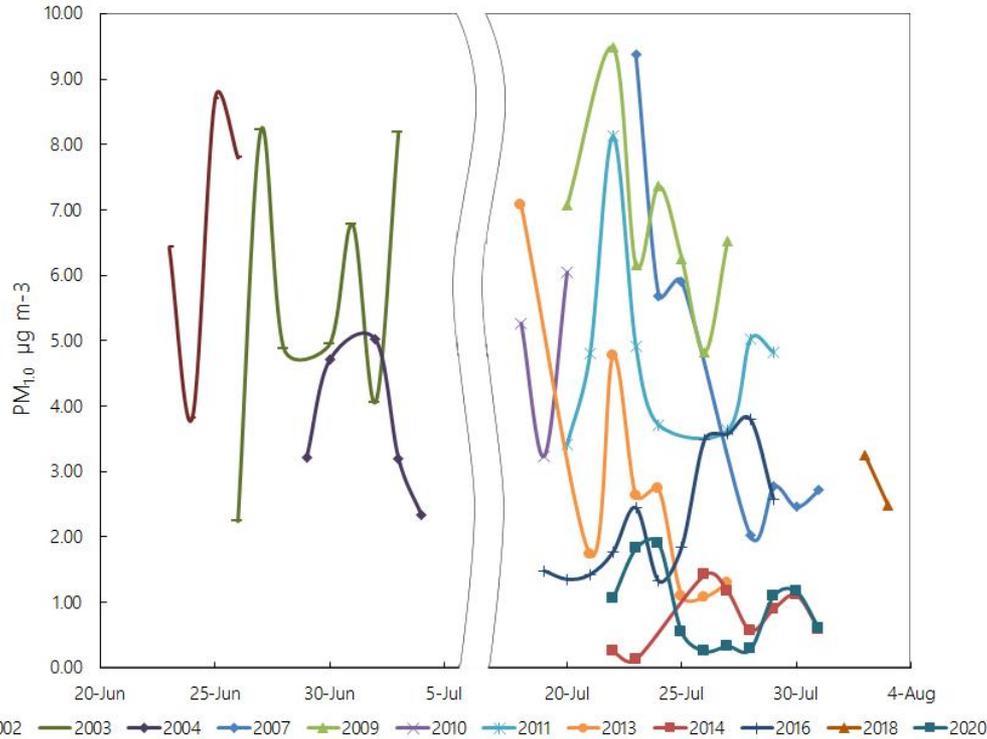
CMSAF product,

на базе SEVIRI instrument для МЕТЕОСАТ  
геостационарного спутника

Черная линия обозначает 5-дневное  
скользящее среднее для 1991–2020  
(сплошная) и для 1966–1995 (пунктирная)

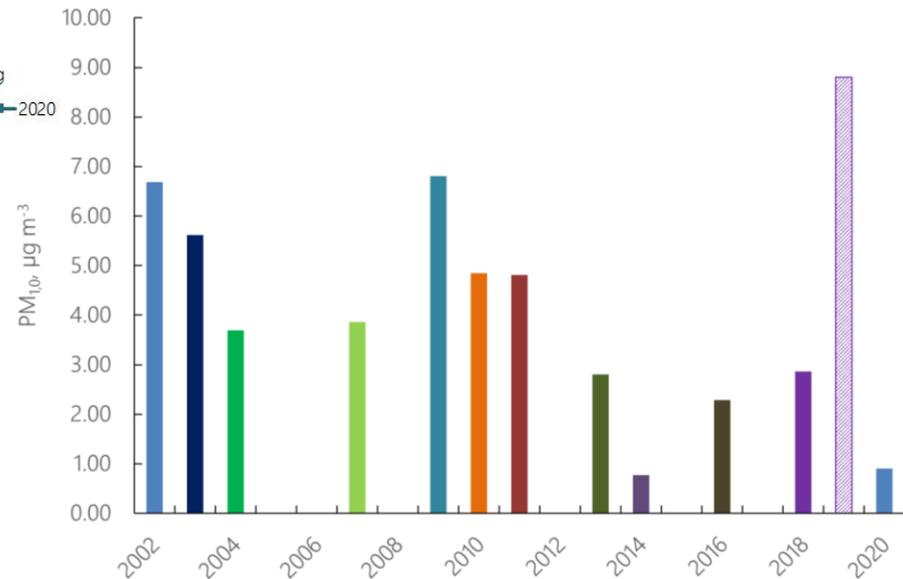


# Массовые концентрации частиц $PM_{1.0}$ по данным ЛАСов для всего периода измерений

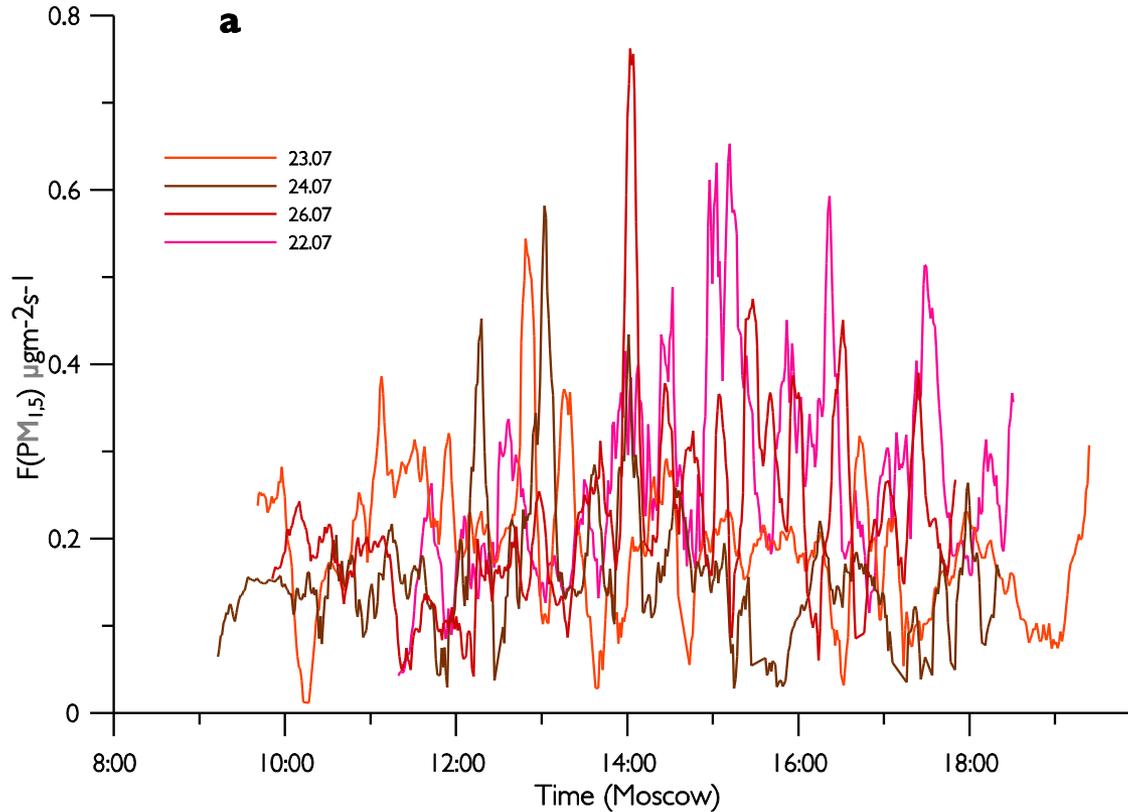


Дневные массовые концентрации  $PM_{1.0}$ .

Ежегодные изменения  $PM_{1.0}$  для  $z_h$ .  
 1 августа 2018 была зафиксирована пыльная буря: среднее значение массовой концентрации в 2018 показано с учетом (заштрихованный) и без учета (заполненный цветом столбик) 1 августа 2018.



# Поток аэрозоля $PM_{1.5}$

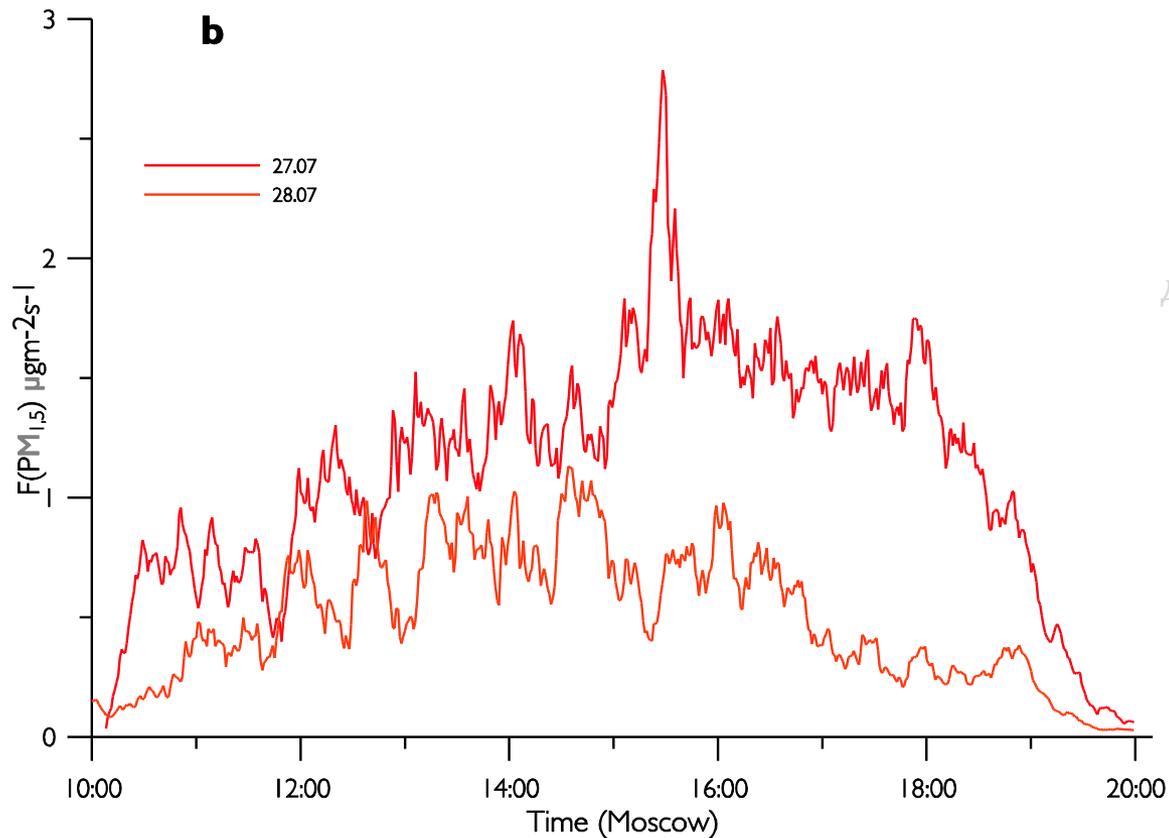


для 22, 23, 25 и 26 июля 2009

для 27 и 28 июля 2011

для 21, 23, 24 и 26 июля 2013

# Поток аэрозоля $PM_{1.5}$

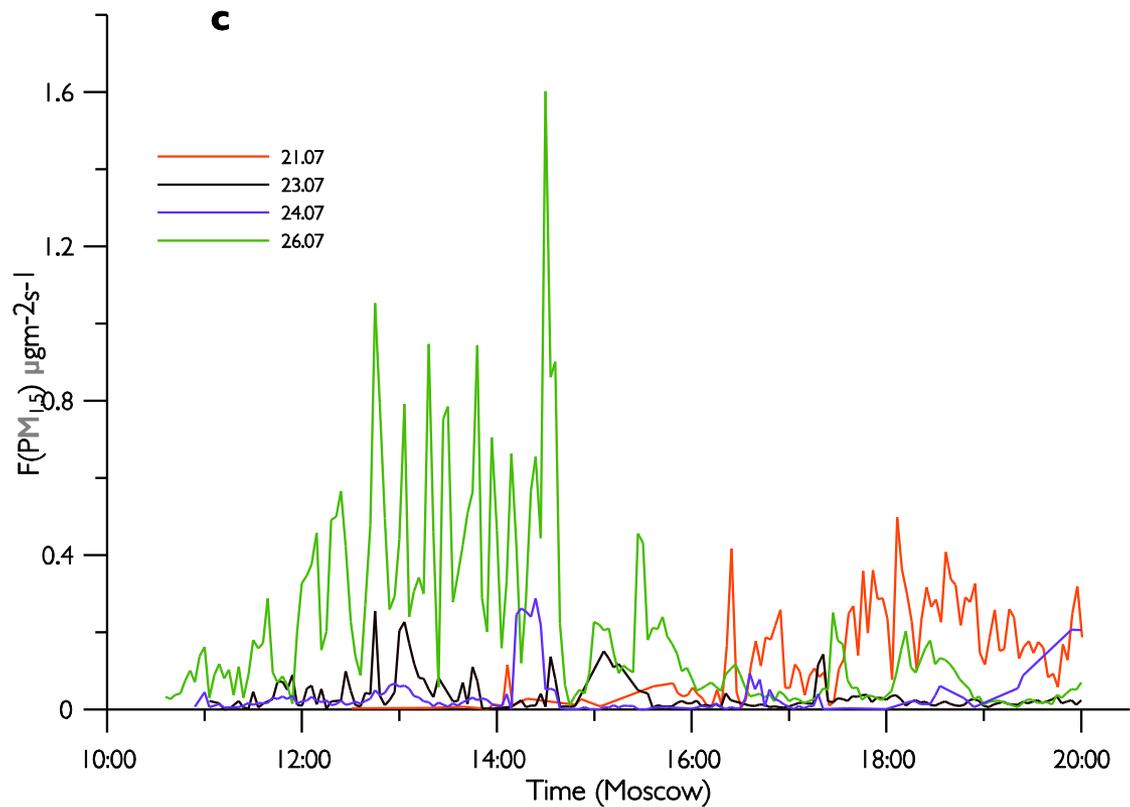


для 22, 23, 25 и 26 июля 2009

для 27 и 28 июля 2011

для 21, 23, 24 и 26 июля 2013

# Поток аэрозоля $PM_{1.5}$

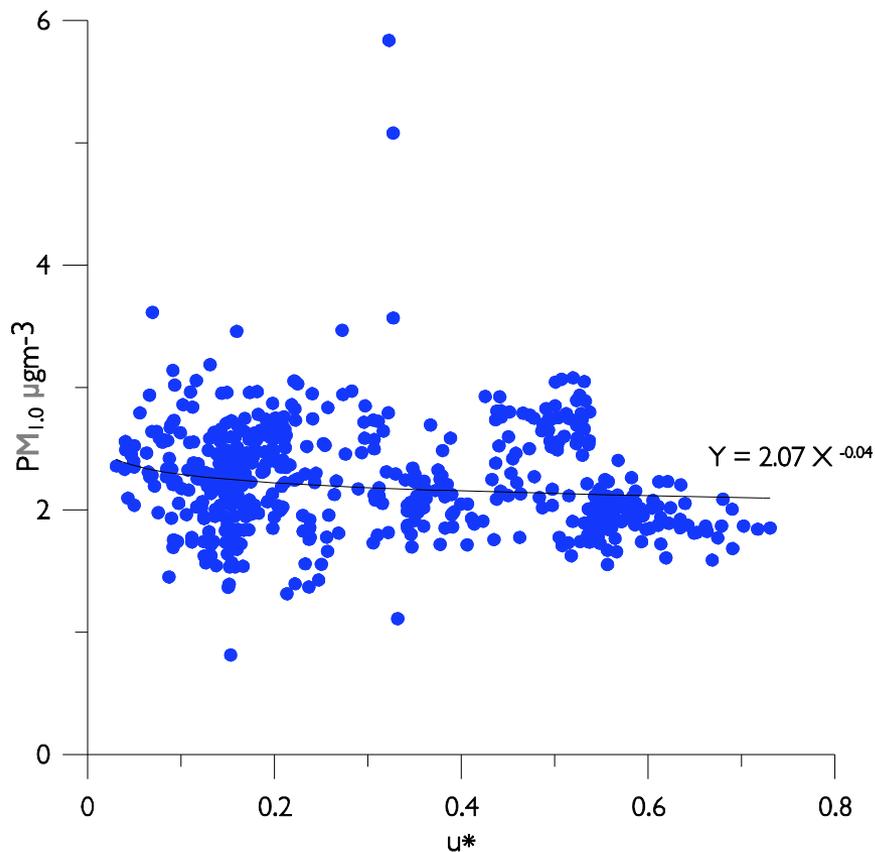


для 22, 23, 25 и 26 июля 2009

для 27 и 28 июля 2011

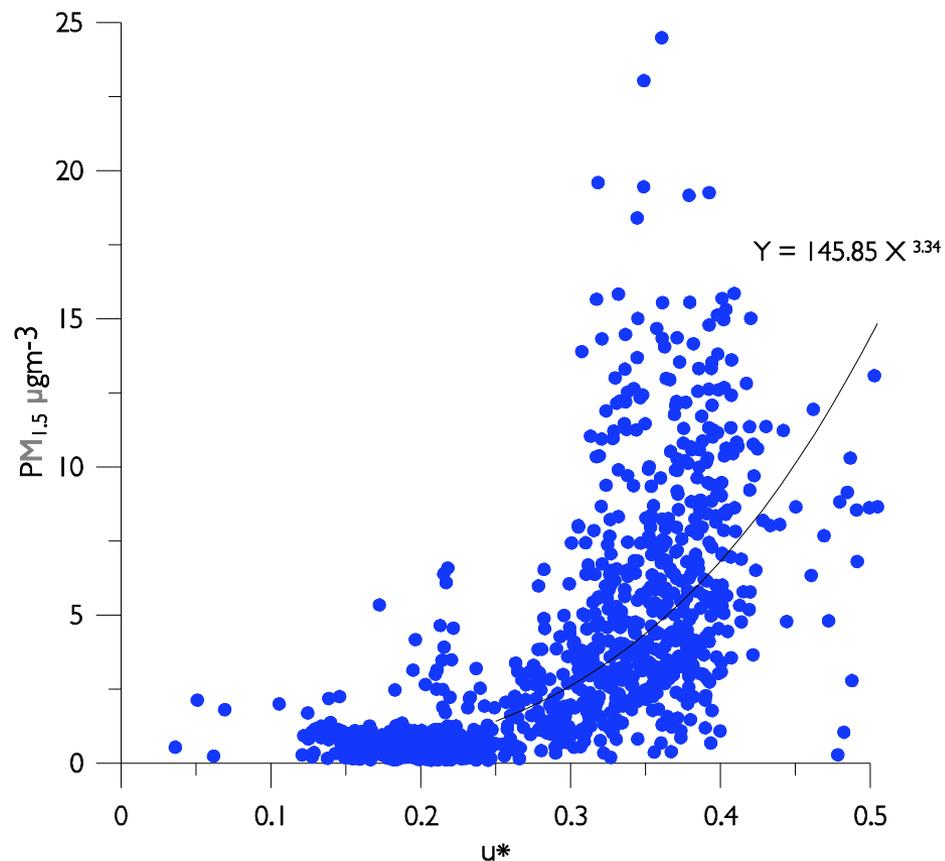
для 21, 23, 24 и 26 июля 2013

# Зависимость массовой концентрации частиц от динамической скорости трения



$PM_{1.0}$ . Конвективный механизм подъема пыли 24 июля 2009.

2009, 2013, 2014



$PM_{1.5}$ . Сальтационный механизм подъема пыли 28 июля 2011.

2010, 2011

# Условия эмиссии аэрозоля

Частицы отрываются от поверхности в момент когда скорость трения

$u^* \approx \sqrt{u'v'}^{1/2}$  достигает критического значения, примерно

**30 см/с.**

Толщина  $\delta^*$  вязкого пограничного слоя

$$\delta^* \sim 5\nu/u^*.$$

где  $u^* \sim 0.5$  м/с,  $\delta^* \sim 100$   $\mu$ м.

Когда  $u^* > u_{crit}$ , частицы диаметром  $d > \delta^*$  могут подниматься.

Частицы с размером  $d \ll \delta^*$  ( $D \sim 0.1 - 10$   $\mu$ м) не выходят из вязкого пограничного слоя.

# Механизмы эмиссии

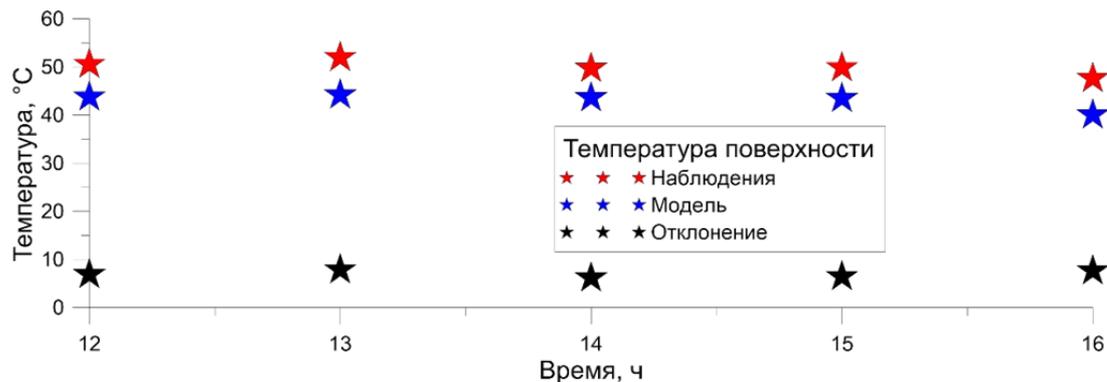
Наиболее распространенные...

- **Сальтация** и ее модификации – для скорости ветра  $\geq 10$  m/s.
- **Конвекция**
- **Однако**, количество тонкого атмосферного аэрозоля и условия, и условия его эмиссии с подстилающей поверхности предполагают, что при слабом ветре существует эмиссия. (**несальтационная эмиссия**).

# Несальтационная эмиссия

- Рассмотрена возможность для мелких частиц подниматься с подстилающей поверхности в случае сильных тепловых потоков  
( $f \sim 200 \div 500 \text{ В/м}^2$ ).
- В воздушном слое толщиной  $\sim 0.5-1 \text{ м}$ , температура падает на  $10-30^\circ\text{С}$ ; основное «падение» приходится на первый сантиметр.
- Воздух над песком вступает в конвективное движение из-за нагрева приповерхностного слоя  $T_s \sim 40 - 70^\circ\text{С}$
- Средний ветер  $\sim 4 \text{ м/с}$

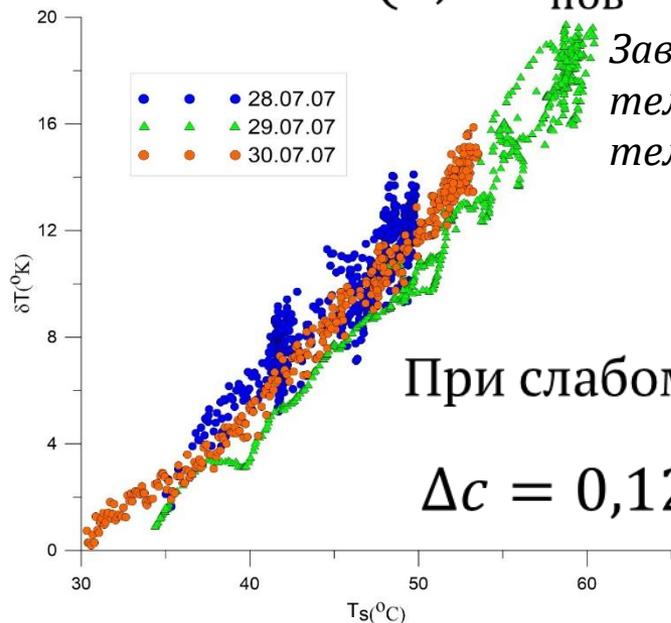
Значения температуры поверхности в данных наблюдений, в модели WRF-Chem и разница этих температур для различных моментов времени днем 28 июля 2007 г.



При сильном ветре ( $u^* > 0,3$  м/с)

$$\Delta c = 4(0,64T_{\text{пов}} - 20)^{-1/3}$$

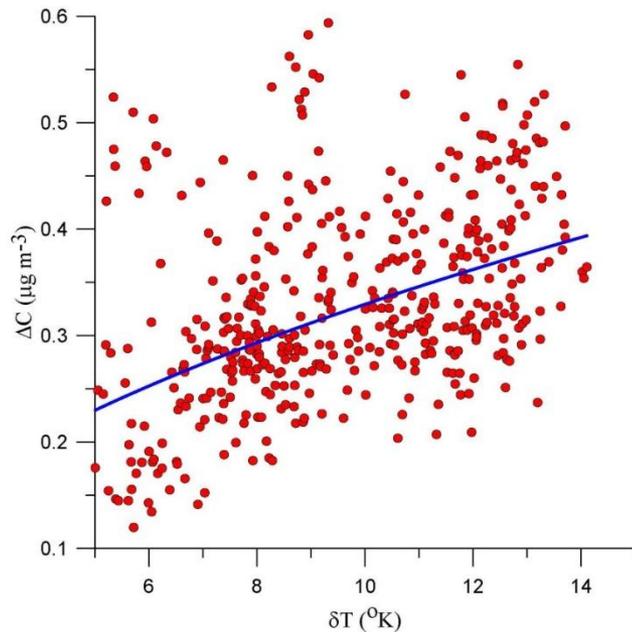
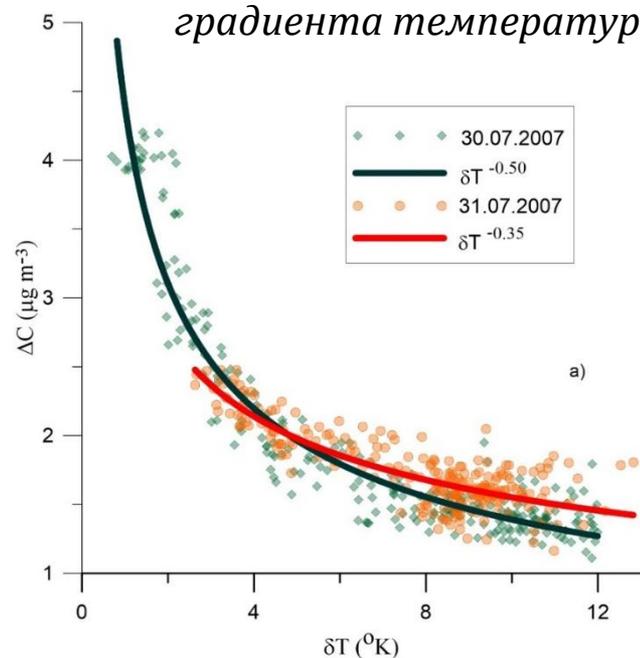
Зависимость градиента температуры от температуры поверхности



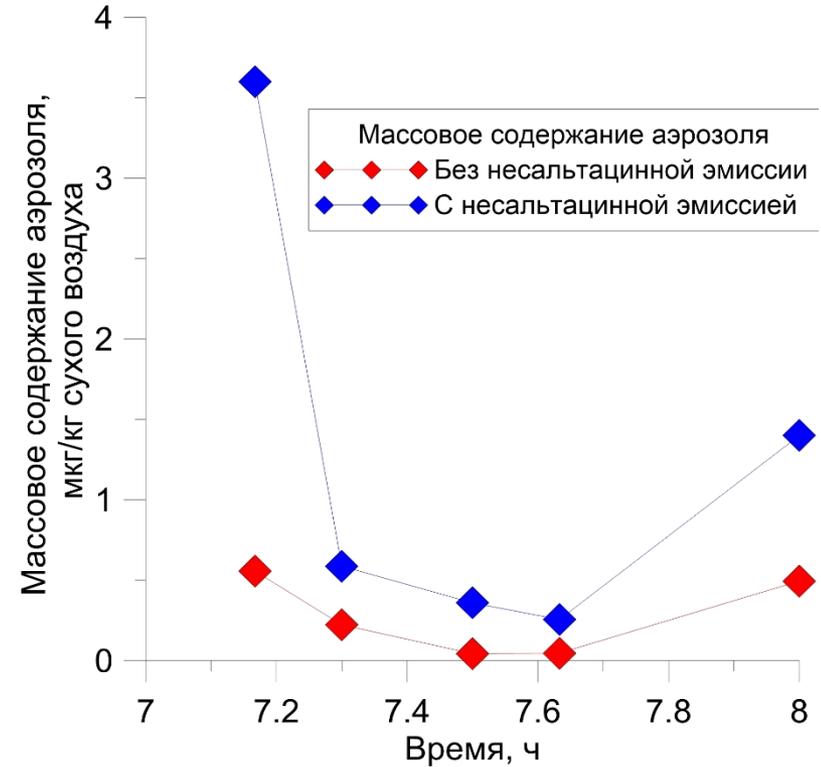
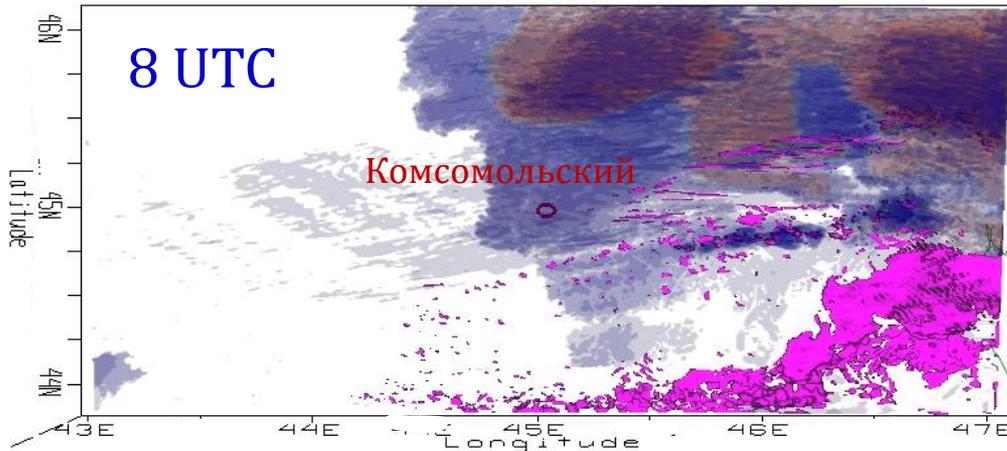
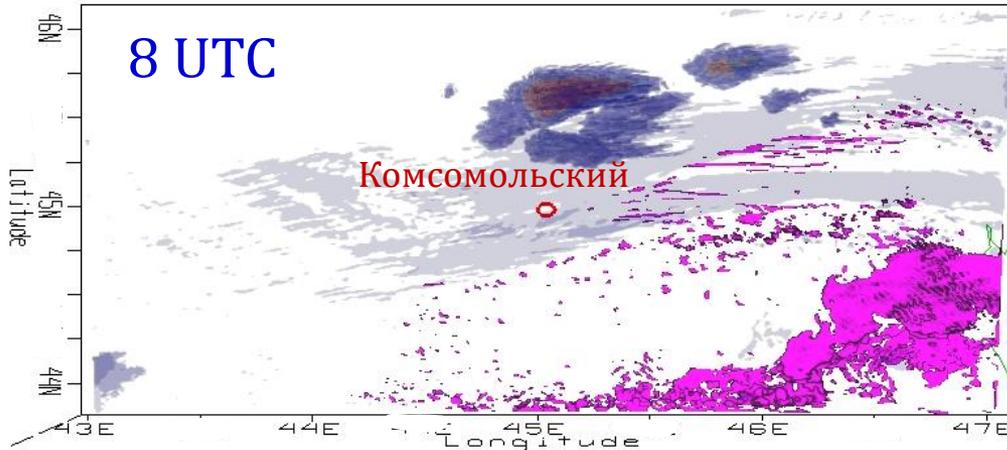
При слабом ветре ( $u^* < 0,3$  м/с)

$$\Delta c = 0,12(0,64T_{\text{пов}} - 20)^{0,5}$$

Концентрации субмикронного аэрозоля в зависимости от градиента температуры



# Учет несальтационной эмиссии аэрозоля при условии слабых ветров



CLDFRA - Isosurface 2007-07-28 08:00:00Z  
Range Rings  
DUST\_1 - Volume Rendering 2007-07-28 08:00:00Z

$d \leq 0,5$  мкм

Доля облачности и массовое содержание минерального аэрозоля (от серого к коричневому в порядке возрастания содержания) – для 8 UTC над районом измерений, вид сверху.

# Заключение

Получены многолетние ряды данных о массовой и счетной концентрации, дисперсном и элементном составе аэрозолей в приземном слое атмосферы аридных территорий степной зоны Калмыкии. Приведены вспомогательные данные о метеорологических параметрах

Определены характерные значения массовой и счетной концентрации аэрозольных частиц в полупустынных зонах Калмыкии в летний период для периода наблюдений 2002–2020 гг. (Массовая концентрация в разные годы наблюдений составляла от нескольких десятков до нескольких сотен  $\text{мкг м}^{-3}$ .)

Подтверждено, что эмиссия аэрозоля возникает в результате двух различных механизмов: **сальтационном** (связанным с турбулентными напряжениями, создаваемыми сдвигом ветра в поверхностном пограничном слое) и **несальтационным** (связанным с сильной конвекцией воздуха над слоем песка в жаркую погоду, когда перепады температуры в тонком приземном слое воздуха достаточны для поднятия и уноса пыли). **Несальтационный** механизм преобладал в Калмыкии для субмезомасштабных частиц в летний период. Из полученных данных: в условиях слабого ветра (недостаточного для включения механизма сальтации) в АПС существует большое количество мелких частиц.

Показано увеличение массового содержания субмикронных частиц в АПС при учете несальтационного механизма эмиссии пыли с подстилающей поверхности аридных зон Калмыкии при условии слабых ветров

Спасибо за внимание!

# Расчет потока частиц

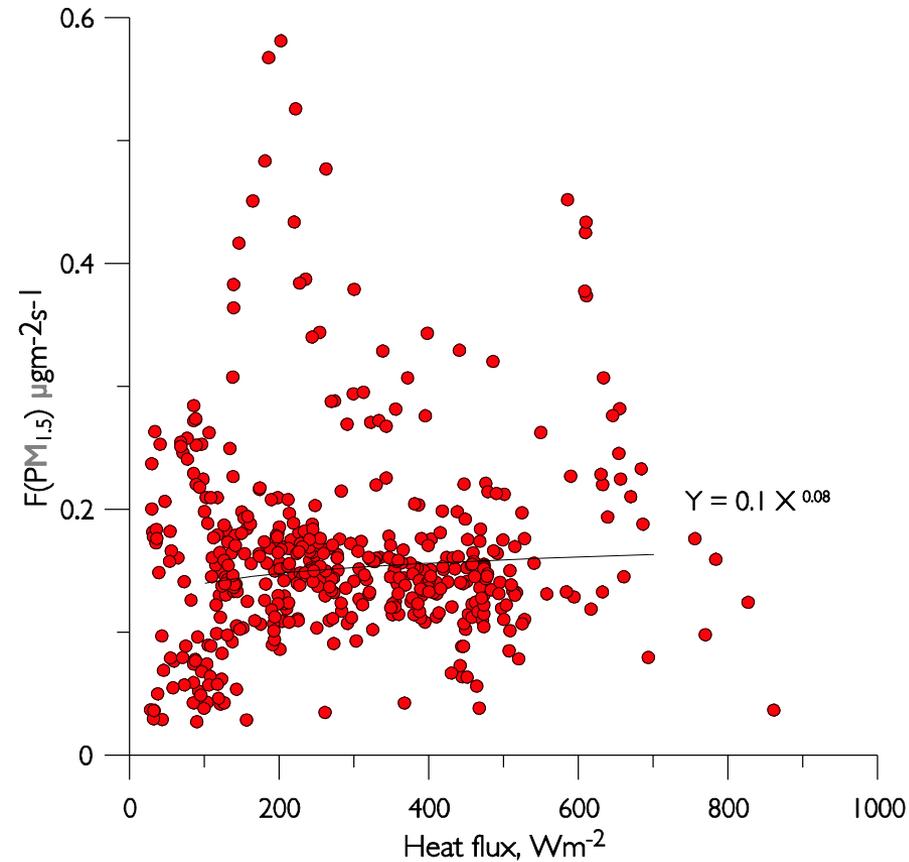
$$F(PM) = u_* k (C_l - C_h) / \ln(z_h/z_l), \quad (1)$$

- $k$  – постоянная Кармана ( $k = 0.4$ ),  $u_*$  – скорость трения,  $C_l$  и  $C_h$  – массовая концентрация пыли, измеренная в поверхностном слое для высот ( $z_l$ ) и ( $z_h$ ) (0.5 и 1.5 (или 2.0, в зависимости от года) м).

$$F_{heat} = - (u_*)^3 (\theta \rho C_p) / k g L_{MO}. \quad (2)$$

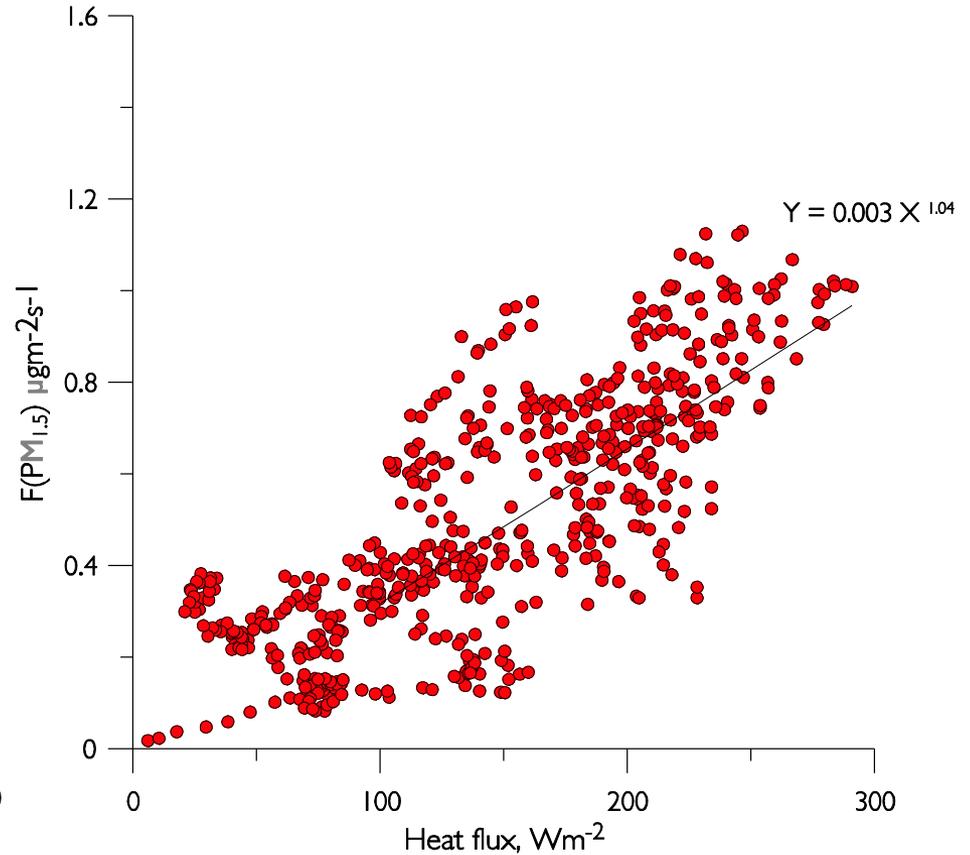
- $k$  – постоянная Кармана ( $k = 0.4$ ),  $L_{MO}$  – длина Монины-Обухова,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\theta$  – температура воздуха,  $\rho$  – плотность воздуха,  $C_p$  – теплоемкость при постоянном давлении.

# Зависимость массовой концентрации частиц от явного потока тепла



$\text{PM}_{1.0}$ . Конвективный механизм подъема пыли 24 июля 2009.

2009, 2013, 2014



$\text{PM}_{1.5}$ . Сальтационный механизм подъема пыли 28 июля 2011.

2010, 2011