

# Проявление опасных погодных явлений в результатах ГНСС-мониторинга тропосферы

**Хуторова О.Г., Мещерова М.В., Хуторов В.Е., Корчагин Г.Е.**  
Казанский федеральный университет г. Казань, Россия



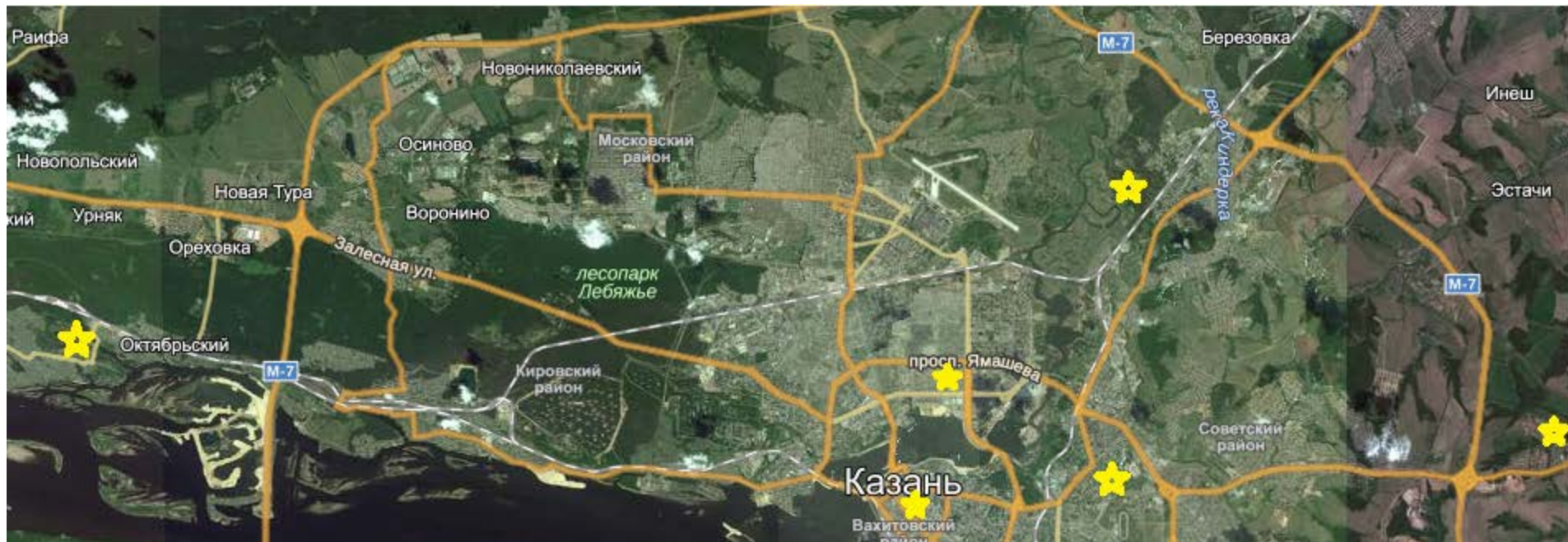
# ЦЕЛЬ

Выявить характерную изменчивость неоднородной структуры поля зенитной тропосферной задержки сигналов спутниковых навигационных систем, ее градиентных параметров и интегрального влагосодержания атмосферы, полученных по данным приемников ГНСС, связанную с конвективными явлениями

# ЗАДАЧИ

- Выбор и оценка физико-статистических параметров неустойчивости, характеризующих интенсивность опасных конвективных явлений по параметрам атмосферы и их сравнение с рядами зенитной тропосферной задержки, ее градиентных параметров, интегрального влагосодержания по данным сети приемников ГНСС
- Исследование статистических свойств интегрального влагосодержания атмосферы, поля зенитной тропосферной задержки радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем, в условиях слабой и сильной конвекции
- Исследование изменчивости зенитной тропосферной задержки радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем, интегрального влагосодержания атмосферы, связанную с опасными конвективными явлениями

# СЕТЬ ПРИЕМНИКОВ ГНСС В РАЙОНЕ Г. КАЗАНИ



## Фазовые измерения приемника

$$L_{ij}^1 = \rho_{ij} - I_{ij} + T_{ij} + N_{ij}\lambda_1 + \zeta_{ij}$$

$$L_{ij}^2 = \rho_{ij} - I_{ij} \frac{f_1^2}{f_2^2} + T_{ij} + N_{ij}\lambda_1 + \zeta_{ij}$$

# Полная зенитная тропосферная задержка и ее градиентные параметры

$$ZTD = \int_{\text{приемник}}^{\text{спутник}} N \cdot 10^{-6} \cdot ds \quad N - \text{индекс рефракции}$$

$$ZTD^i(t, A^i, z^i) = ZTD^i(t)m(z^i) + {}^n ZTD(t) \frac{\partial m}{\partial z} \cos(A^i) + {}^e ZTD(t) \frac{\partial m}{\partial z} \sin(A^i)$$

${}^n ZTD$  – меридиональный градиент на станции наблюдений,

${}^e ZTD$  – зональный градиент на станции,

$A$  - азимут направления на спутник,  $i$  – номер спутника,

$m$  – картирующая функция,

$z$  – зенитный угол для наблюдения (Dach et al. 2015) и (Meindl et al, 2004).

# ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ZTD В ИНТЕГРАЛЬНОЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ (IWV)

Индекс рефракции (Rueger J.M. Refractive indices of light, infrared and radio waves in the atmosphere: UNISURV Report S-68, 2002):

$\rho$  - плотность воздуха     $e$  - давление водяного пара  
 $T$  - температура

$$N = 223.009 \cdot \rho + 22.9744 \cdot \frac{e}{T} + 375463 \cdot \frac{e}{T^2}$$

ZTD

(измеряется)

ZHD

(гидростатическая часть -  
моделируется)

ZWD

(влажная часть -  
пропорциональна IWV)

$$IWV = \frac{ZWD}{K(T_s)}$$

# Исследуем вариации ГНСС параметров

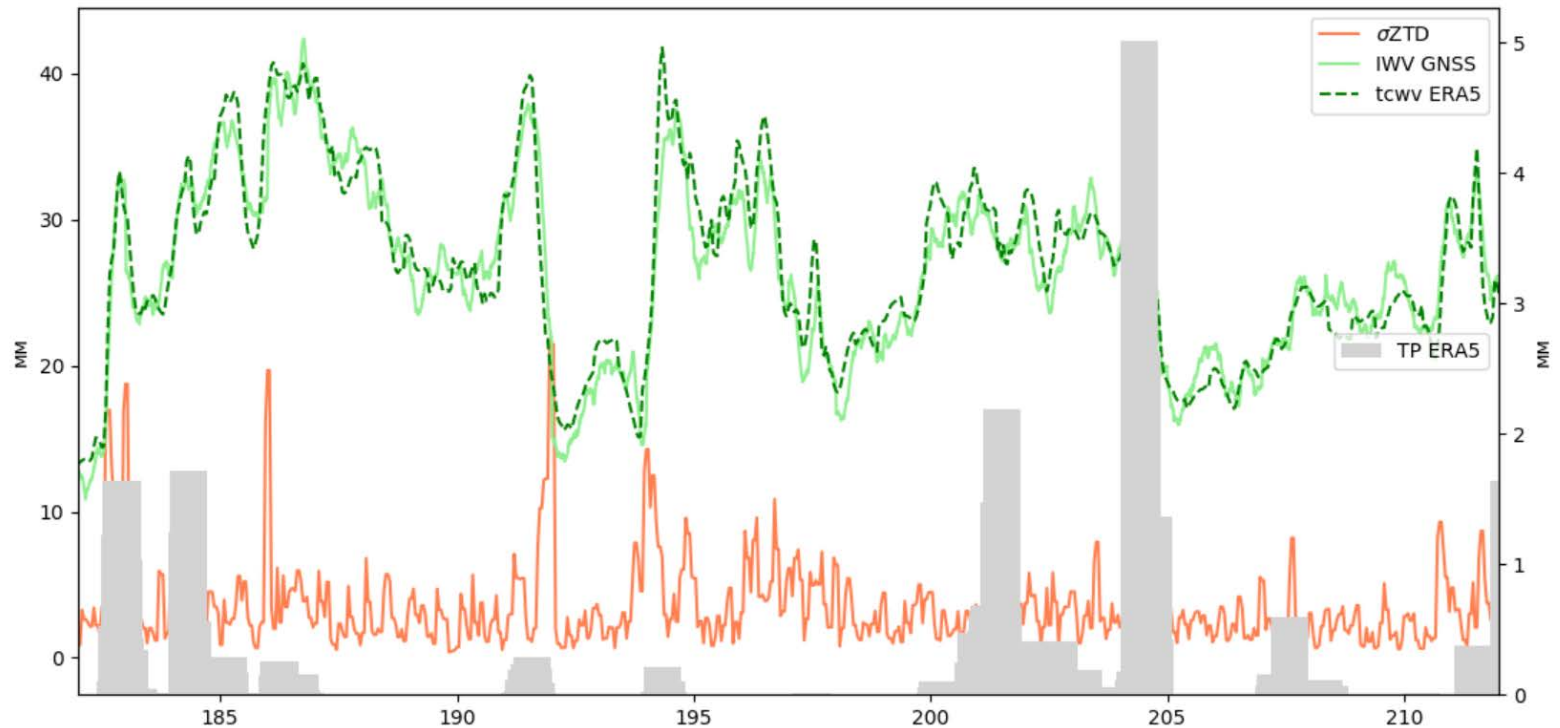
- Зональный и меридиональный горизонтальные градиентные параметры зенитной тропосферной задержки (компоненты вектора градиента  $ZTD$ ) были преобразованы в величину градиента  $dZTD$  и направление градиента  $A_{dZTD}$

$$dZTD = \sqrt{{}^nZTD^2 + {}^eZTD^2} \quad A_{dZTD} = \arctan\left(\frac{{}^nZTD}{{}^eZTD}\right)$$



# Сравнение IWV и tcwv ERA5 (июль 2020)

Июль 2020, Казань



# Физико-статистические параметры неустойчивости, доступные в данных реанализа ERA5

- CIN, энергия противодействия конвекции (Convective Inhibition)

$$CIN = g \int_0^{LFC} \frac{T'_p - T'}{T'} dz$$

- CAPE, доступная потенциальная энергия неустойчивости (Convective Available Potential Energy)

$$CAPE = g \int_{LFC}^{EL} \frac{T'_p - T'}{T'} dz$$

- TP, количество осадков (Total precipitation)
- Vertical Totals (VT) - разница температур между уровнями 850 гПа и 500 гПа.
- Total Totals (TT) -  $TT = T_{850} + Td_{850} - 2 \cdot T_{500}$ .
- Индекс Вайтинга или K Index,

$$K\text{-Index (K)} = (T_{850} - T_{500}) + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700})$$

## Физико-статистические параметры неустойчивости, доступные в данных реанализа ERA5

- Сдвиг ветра в слое 1 км или Low level Shear (LLS).
- Сдвиг ветра в слое 3 км – Mid-level Shear (MLS)
- Сдвиг ветра в слое 6 км - Deep Layer Shear (DLS).
- Восходящая вертикальная скорость или Upward Vertical Velocity (UVV)

$$UVV = \sqrt{2 \cdot CAPE}$$

- Параметр генерации вихря или VGP

$$VGP = \sqrt{2 \cdot CAPE \cdot MLS}$$

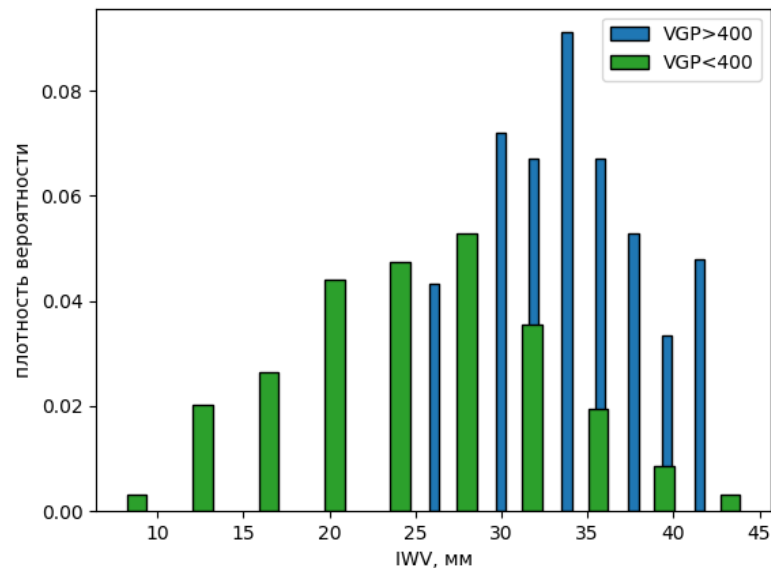
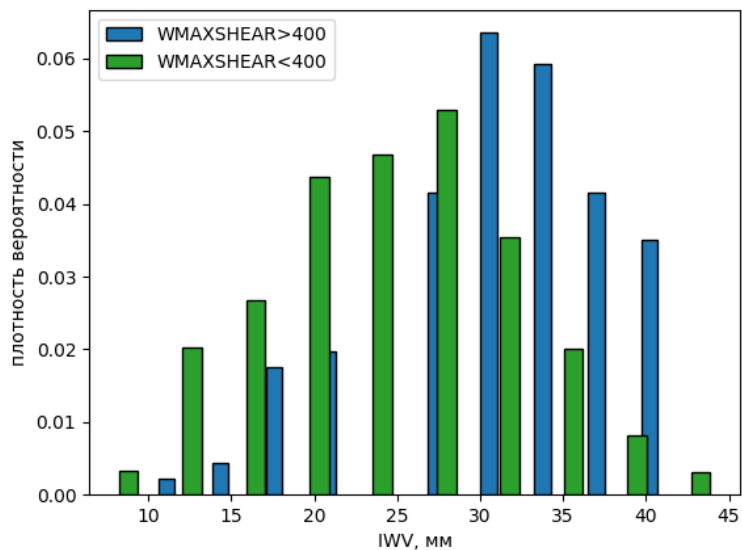
- Комплексный индекс

$$WMAXSHEAR = \sqrt{2 \cdot CAPE \cdot DLS}$$

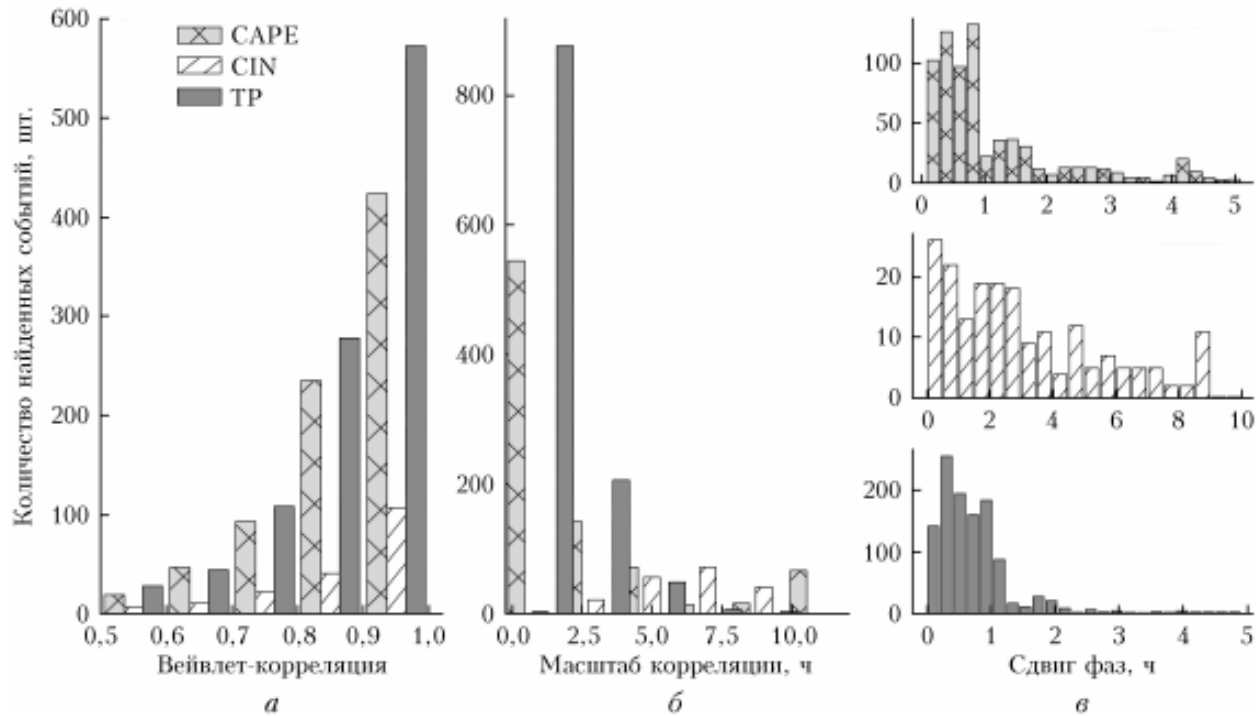
# Проанализированы статистические свойства распределения IWV

Параметр конвекции	Граничные значения индекса	Разница средних значений IWV, мм	Разница медианных значений IWV, мм
LLS	17 м/с	Статистически незначимая	Статистически незначимая
MLS	16 м/с	5,1	8,5
DLS	25 м/с	2,2	3,1
VT	30 К	2,8	5,6
TT	55 К	7,6	10,1
К-индекс	40 К	2,8	5,8
CAPE	800 Дж/кг	11,4	11,6
UVV	40 м/с	10,6	11,6
VGP	400 м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	11,4	11,8
WMAXSHEAR	400 м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	8,9	9,3
CIN	100 Дж/кг	Статистически незначимая	Статистически незначимая
TP	1 мм	6,9	7,9

# Распределения $IWV$ при сильной и слабой конвекции разграниченные по величине $WMAXSHEAR$ (Комплексный индекс) и $VGP$ (Параметр генерации вихря)



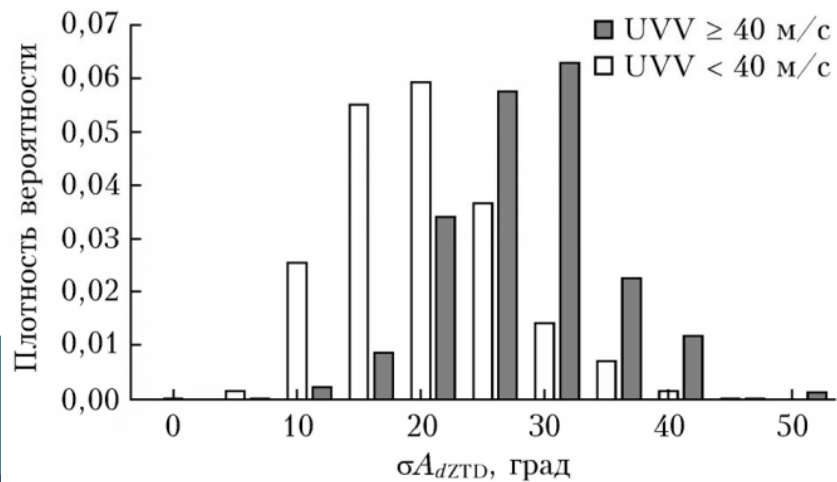
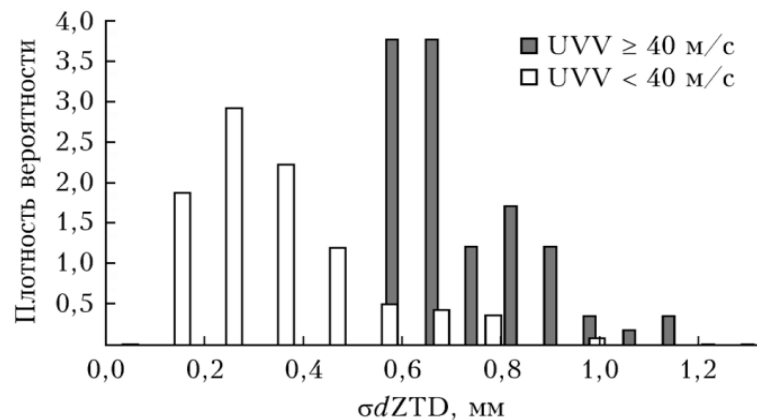
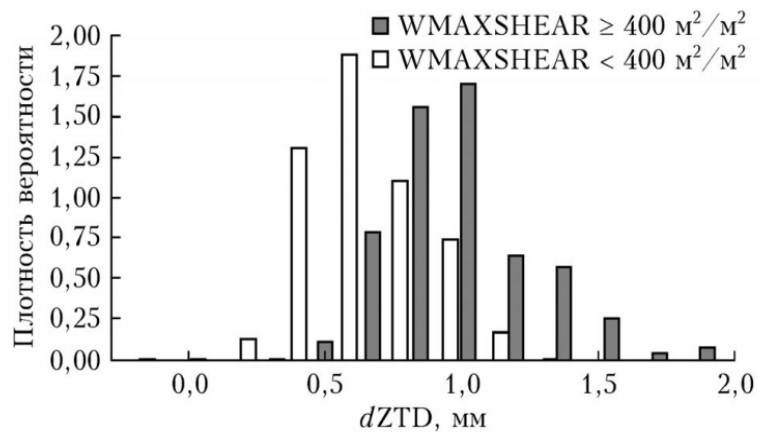
Вейвлет-корреляция выделенного импульса с вариациями IWV, ZTD, ее меридионального и зонального градиентных параметров соответствующего временного масштаба и сдвиг фаз между ними



Медианы градиента IWV, dZTD и его флуктуаций для выборок, соответствующих граничным значениям конвективных индексов (сильной и слабой конвекции согласно конвективному индексу)

Параметр	UVV		VGP		WMAXSHEAR	
	≥40 м/с	<40 м/с	≥400 м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	<400 м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	≥400 м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	<400 м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>
IWV, мм	35	23	35	23	33	23
dZTD, мм	0,87	0,73	0,89	0,73	0,87	0,72
Внутрисуточные флуктуации dZTD, мм	0,45	0,37	0,46	0,36	0,47	0,36
Внутрисуточные флуктуации A <sub>dZTD</sub> , мм	27	31	26	21	26	21

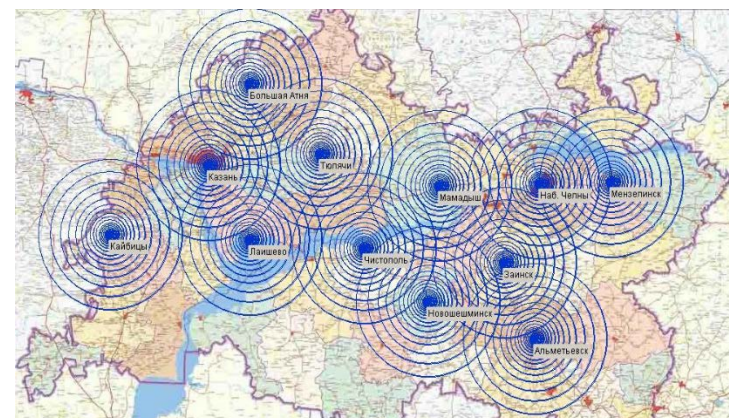
# Распределение выборок dZTD для условий слабой и сильной конвекции в соответствии с различными индексами





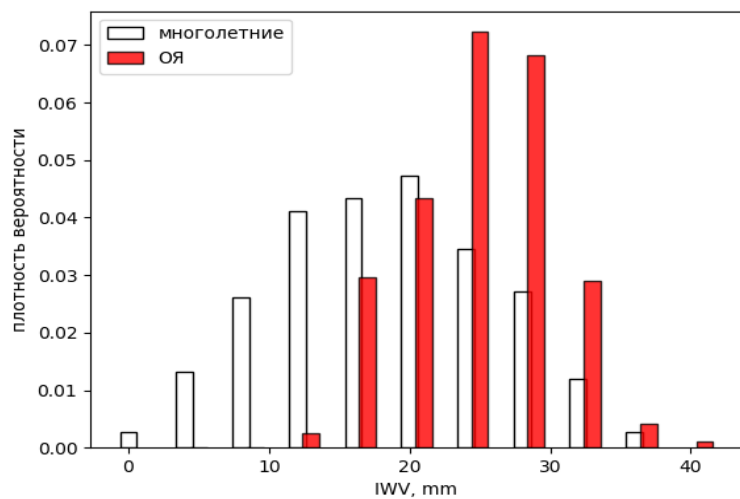
# Выборка ГНСС измерений в РТ, соответствующих событиям опасных явлений из Европейской базы данных суровой погоды (<https://eswd.eu/>)

Дата	Время начала	Время конца	Широта	Долгота	Явление
07.09.2015	12:00		55.75	49.13	шторм
18.07.2015	9:00		56.08	49.87	сильный порыв ветра
16.07.2015	11:45		56.18	50.89	смерч
11.07.2015	16:00		56.12	49.20	смерч
10.07.2015	14:00		55.85	48.52	крупный град
10.07.2015	14:00		55.48	49.44	сильный порыв ветра
10.07.2015	14:00		55.75	49.65	сильный порыв ветра
10.07.2015	14:00		55.20	49.27	сильный

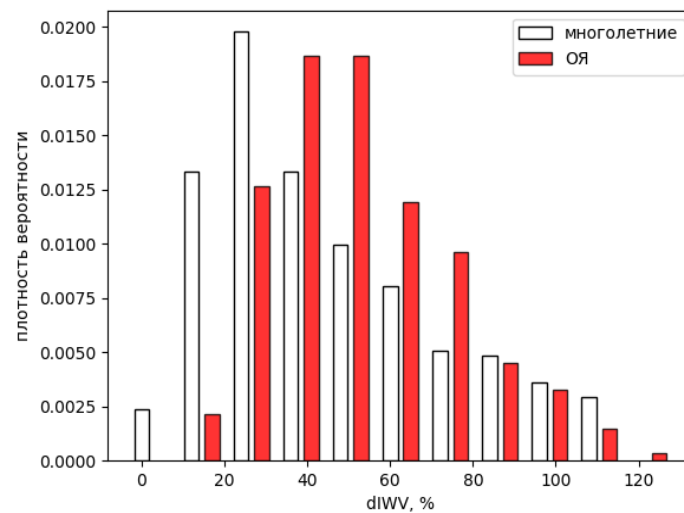


# Распределения характеристик атмосферы, полученные по многолетним данным и для всех суток, когда наблюдались какие-либо из опасных явлений (ОЯ)

а) IWV б) dIWV

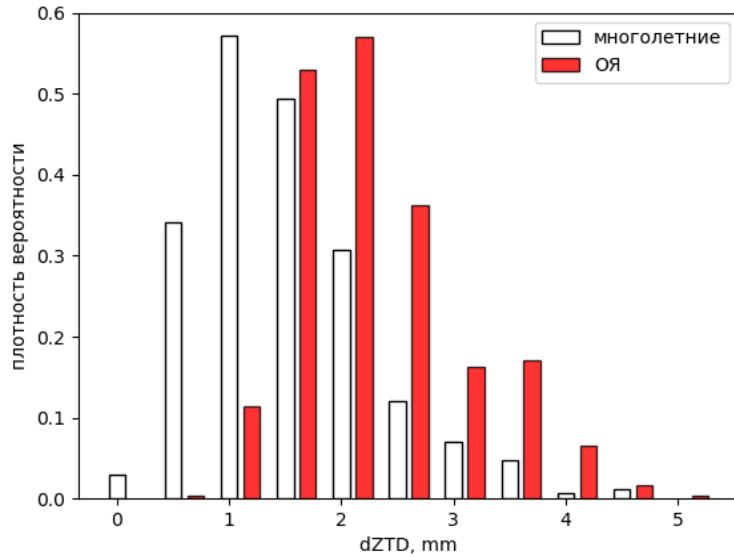


а)

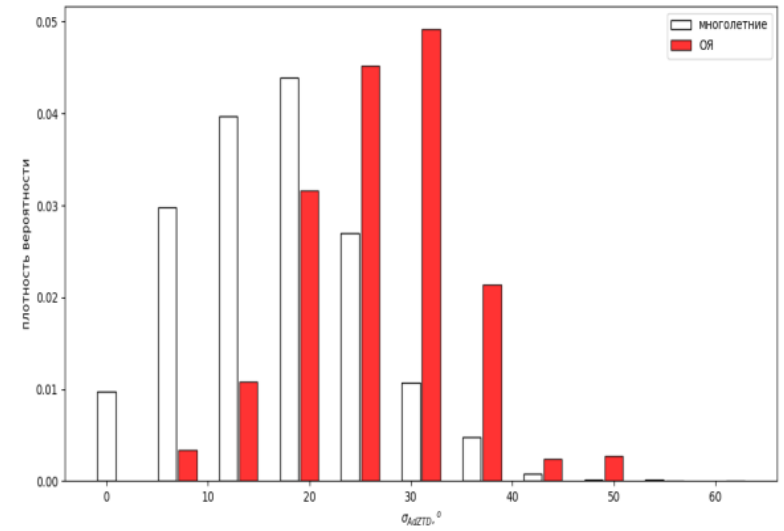


б)

Распределения характеристик атмосферы, полученные по многолетним данным и для всех суток, когда наблюдались какие-либо из опасных явлений (ОЯ)  
 а) градиент  $dZTD$  б) среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{dZTD}$



а)



б)

## Характеристики ГНСС параметров для событий опасных явлений в сравнении с многолетними данными

	Средне-многолетние данные	Расстояние антенны до ОЯ $D \leq 20$ км (Сильный ветер)	Расстояние антенны до ОЯ $20 \text{ km} < D \leq 200$ км (Сильный ветер)	Расстояние антенны до ОЯ $D \leq 20$ км (град, ливень, гроза)	Расстояние антенны до ОЯ $20 \text{ km} < D \leq 200$ км (град, ливень, гроза)
Медианное значений среднесуточного IWV, мм	19	25	25	29	25
Изменчивость IWV за сутки, медиана распределения	28%	54%	46%	51%	48%
Медианное значений максимального за сутки градиента dZTD, мм	1,6	2,1	2	1,8	1,8
Медианное значений	19	25	25	29	25

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Для оценки конвективных процессов получены длинные ряды физико-статистических параметров неустойчивости, зенитная тропосферная задержка, ее градиентные параметры и интегральное влагосодержание тропосферы за 2009-2021 гг.
- Показано, что статистические характеристики интегрального влагосодержания атмосферы существенно изменяются в зависимости от индексов CAPE (доступная потенциальная энергия неустойчивости), WMAXSHEAR (показатель глубокой конвекции), восходящей вертикальной скорости и параметра генерации вихря.
- Все опасные явления, и в частности, такие как сильный ветер, град, ливень, гроза, проявляются в данных мониторинга увеличением интегрального влагосодержания атмосферы, величины градиента и флуктуаций градиента зенитной тропосферной задержки.
- Конвекция — вертикальный перенос, а ГНСС характеристики характеризуют горизонтальные неоднородности. Тем не менее, можно дополнять другие данные по неоднородной структуре, хотя основываться только на данные ГНСС невозможно.

**Спасибо за внимание!**

