

# О точности измерений тропосферной задержки сигнала

*Г. Н. Ильин, В. Ю. Быков, И. С. Гаязов, В. В. Суворкин, С. Л. Курдубов*

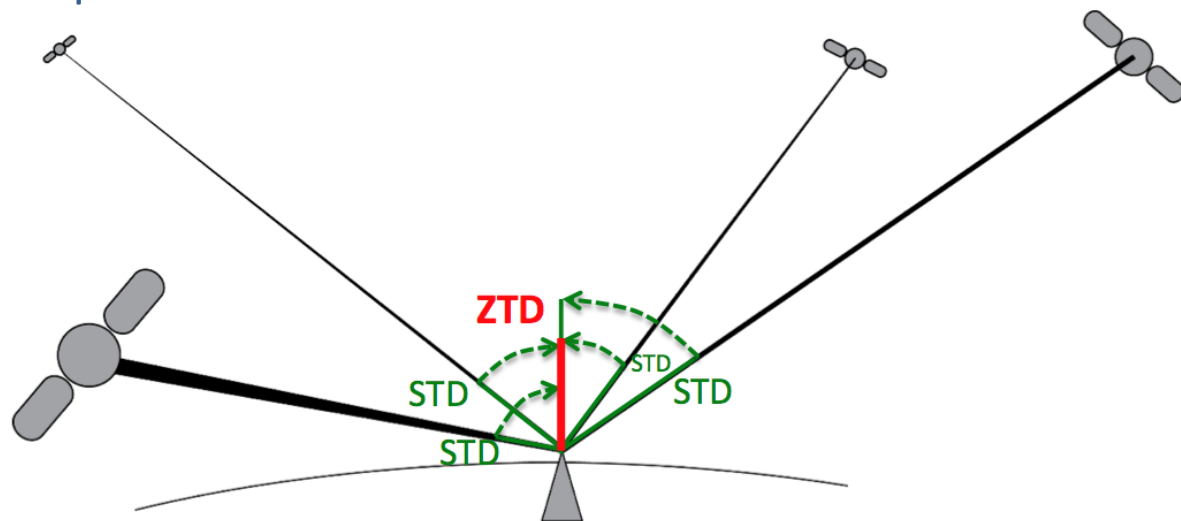
*Институт прикладной астрономии Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия*



$$STD = ZTD_w \cdot m_d(e) + ZTD_d \cdot m_d(e) + m_g(e)[G_N \cos(a) + G_E \sin(a)]$$

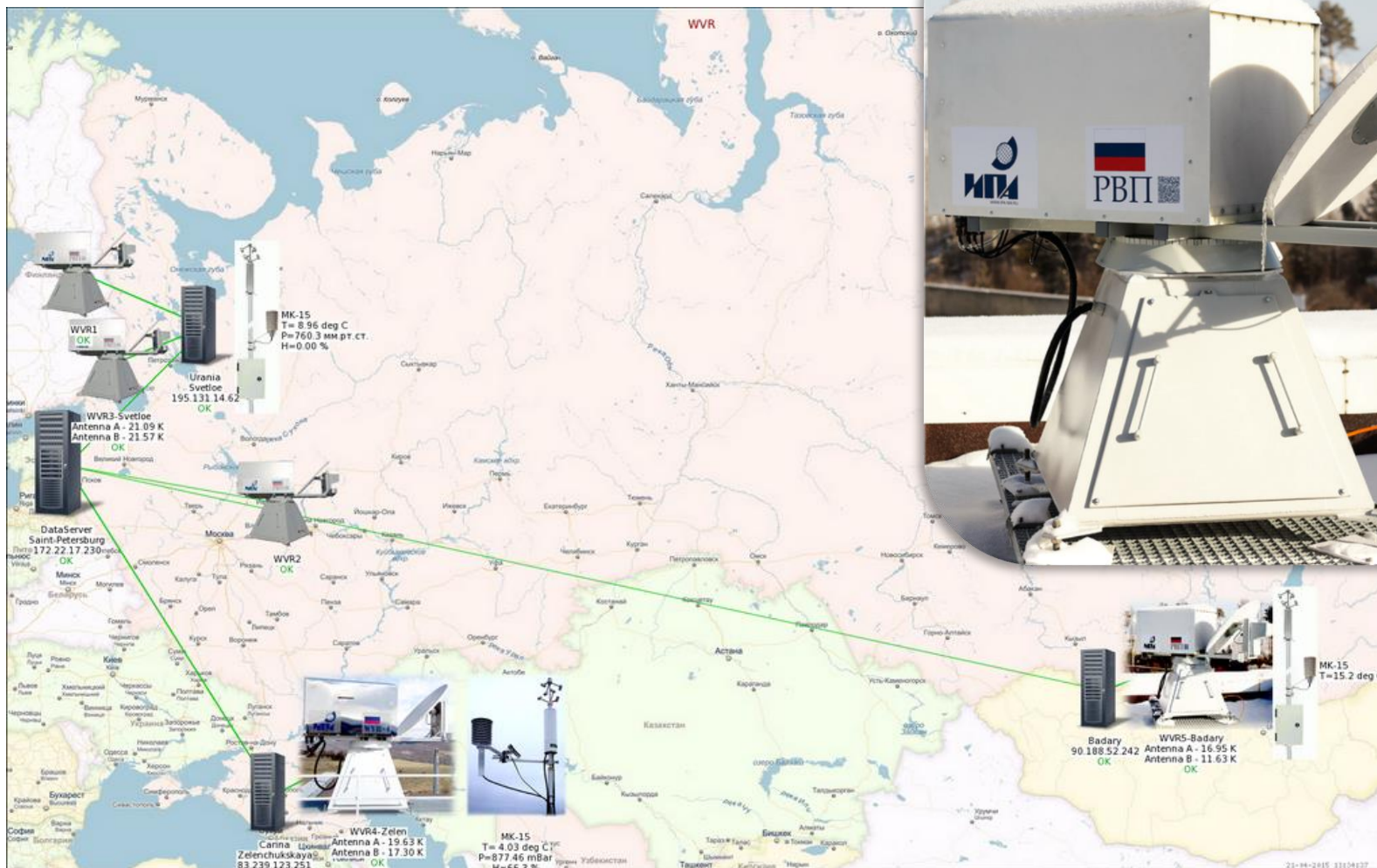
**STD** – slant troposphere delay (по направлению на источник)

**ZTD** – zenith trop. Delay (по направлению в зенит).



$m_e(e)$  – картирующие функции

## РВП, WVR (Water Vapour Radiometer)



- Измерение яркостной температуры излучения атмосферы на двух частотах К и Ка

Оценивается:

- влажностная компонента тропосферной задержки (ВТЗ) распространения радиосигнала
- интегральное влагосодержание (кг/м<sup>2</sup>)
- водосодержание (кг/м<sup>2</sup>) на луче зрения антенны
- используются значения средней температуры тропосферы по стандартной модели или измерения температурного профилера МТР-5 (НПО АТТЕХ, г. Долгопрудный)

$$STD(e) = ZTD \cdot m(e)$$

$$ZTD = ZTD_d + ZTD_w$$

Сухая компонента вычисляется по формуле Саастамойнена:

$$ZTD_d = \frac{[(0.0022768 \pm 0.0000005)]P_0}{1 - 0.00266 \cos 2\phi - 0.00000028H}$$

Пакет обработки РСДБ-наблюдений **QUASAR**, в рамках Службы ПВЗ ИПА РАН

### Определяемые параметры:

- Поправки часов станций
- Параметры вращения Земли (только Всемирное время для часовых сессий)
- Влажная составляющая тропосферной задержки (для суточных сессий дополнительно тропосферные градиенты)

«Сухая» составляющая задержки вычисляется по формуле

Саастамойнена

Параметризация для зенитной ТЗ:

- По часовым сессиям – определяется одна поправка
- По суточным – линейных ход + стохастический сигнал (метод СКК)

Тропосферная задержка:

$$STD(e) = ZPD \cdot m(e)$$

### Картирующие функции:

- Оперативный режим – **Niel MF**
- Постобработка – **VMF1**

## Пакет обработки ГНСС-измерений, в рамках Службы ПВЗ ИПА РАН

### Режим обработки:

- 24-часовые безразностные измерения ~70 станций глобальной сети
- Задержка результатов ~10 часов (по GPS-времени)

### Определяемые параметры:

- Орбиты и параметры светового давления КА
- Вещественные фазовые неоднозначности
- Поправки часов станций и КА
- Параметры вращения Земли
- Полная тропосферная задержка

Параметризация для зенитной ТЗ,  
Полином Чебышёва:

$$T_0(x) = 1$$

$$T_1(t) = t$$

$$T_{n+1}(t) = 2tT_n(t) - T_{n-1}(t)$$

Картирующие функции  $m(e)$ :

**GMF** или **VMF1**

Картирующая функция  $m_g(e)$ :

(Herring, 1997)

## International GNSS Service

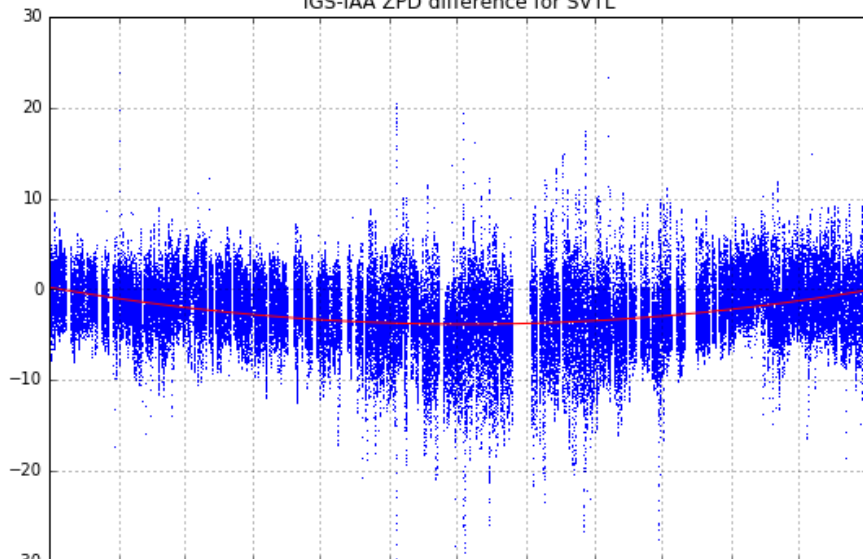
Тропосферные данные:

[ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/trop\\_zpd/](ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/trop_zpd/)

- Организация: US Naval Observatory, Washington DC
- Пакет обработки: **Bernese GPS Software Version 5.0**
- Используются комбинированные орбиты и часы из решений IGS final
- Определяется полная тропосферная задержка и горизонтальные градиенты
- Картирующая функция – **GMF**
- Заявленная точность **3-4 мм**



IGS-IAA ZPD difference for SVTL

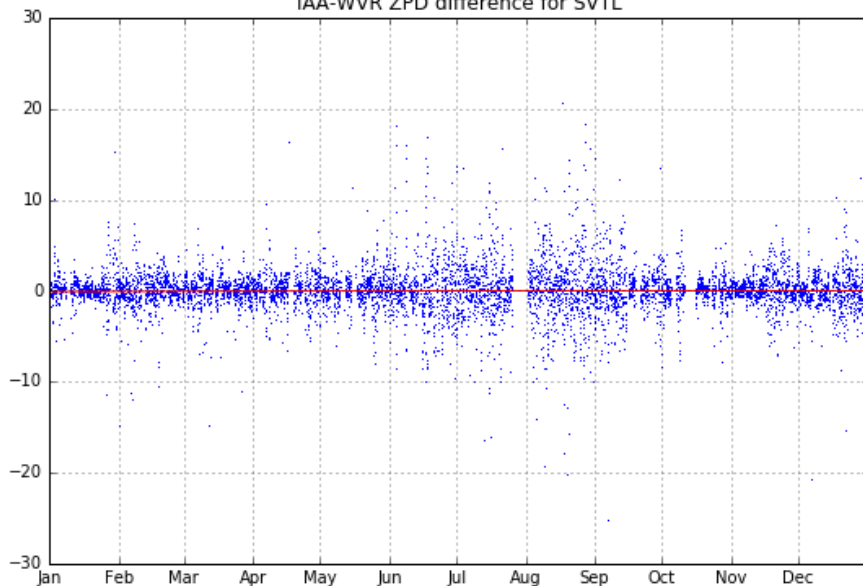


**igs\_iaa**  
**rms: 4.6mm mean: -2.5mm  $\sigma$ : 3.9mm**

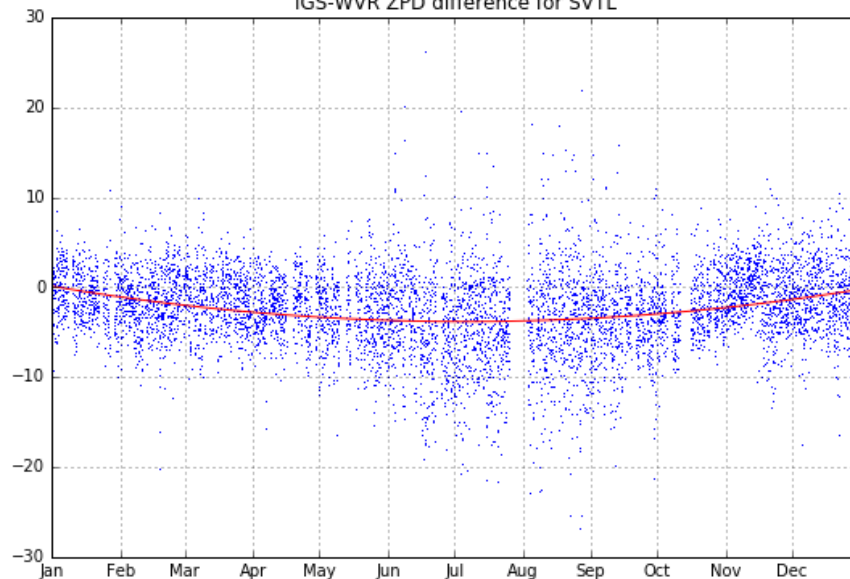
**iaa\_wvr**  
**rms: 2.6mm mean: -0.0mm  $\sigma$ : 2.6mm**

**igs\_wvr**  
**rms: 5.2mm mean: -2.5mm  $\sigma$ : 4.5mm**

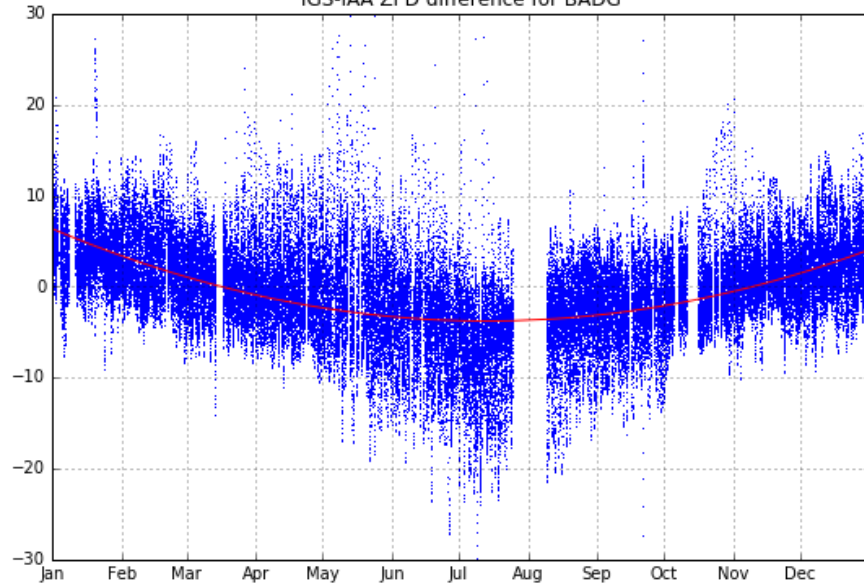
IAA-WVR ZPD difference for SVTL



IGS-WVR ZPD difference for SVTL



IGS-IAA ZPD difference for BADG

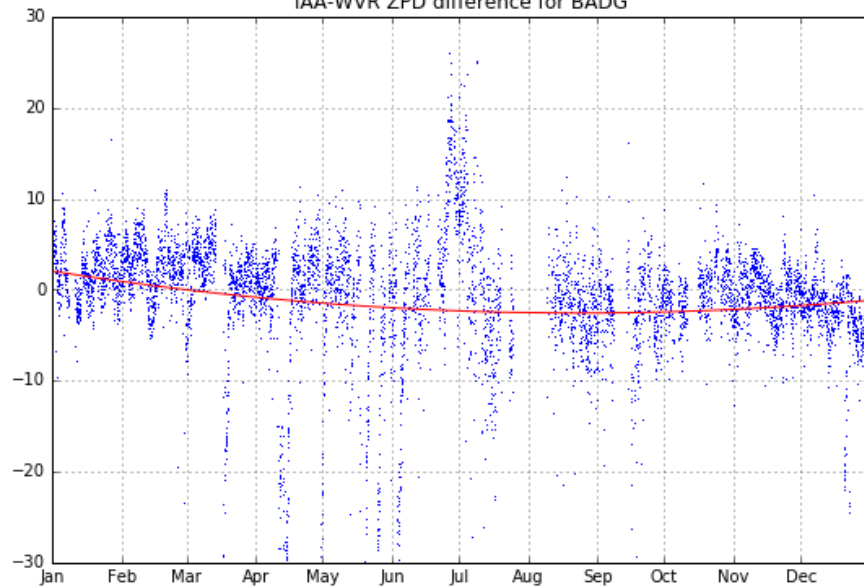


**igs\_iaa**  
**rms: 5.3mm mean: -0.6mm  $\sigma$ : 5.2mm**

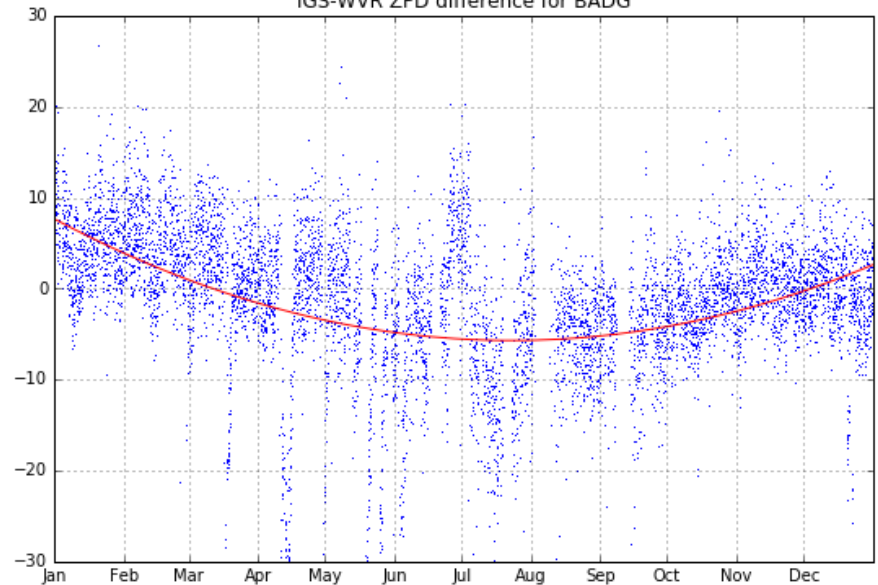
**iaa\_wvr**  
**rms: 7.8mm mean: -1.3mm  $\sigma$ : 7.7mm**

**igs\_wvr**  
**rms: 8.8mm mean: -1.6mm  $\sigma$ : 8.6mm**

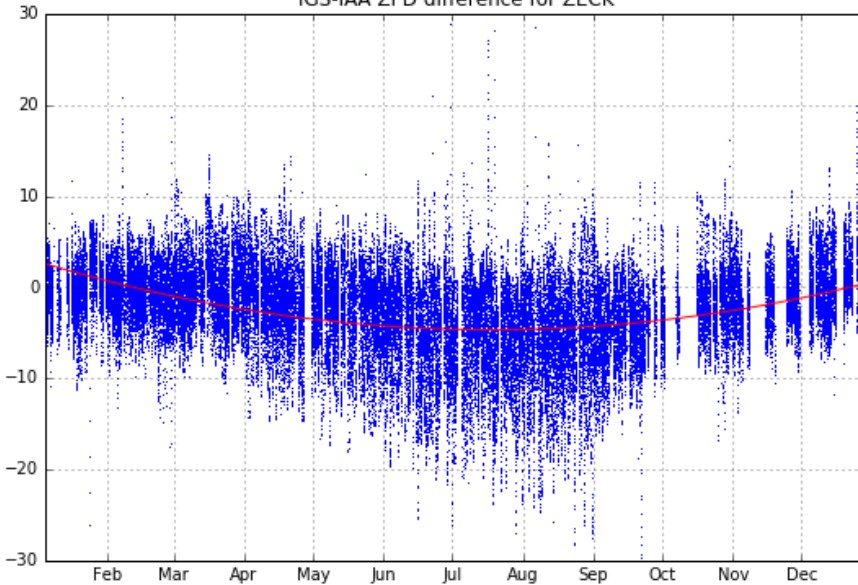
IAA-WVR ZPD difference for BADG



IGS-WVR ZPD difference for BADG



IGS-IAA ZPD difference for ZECK

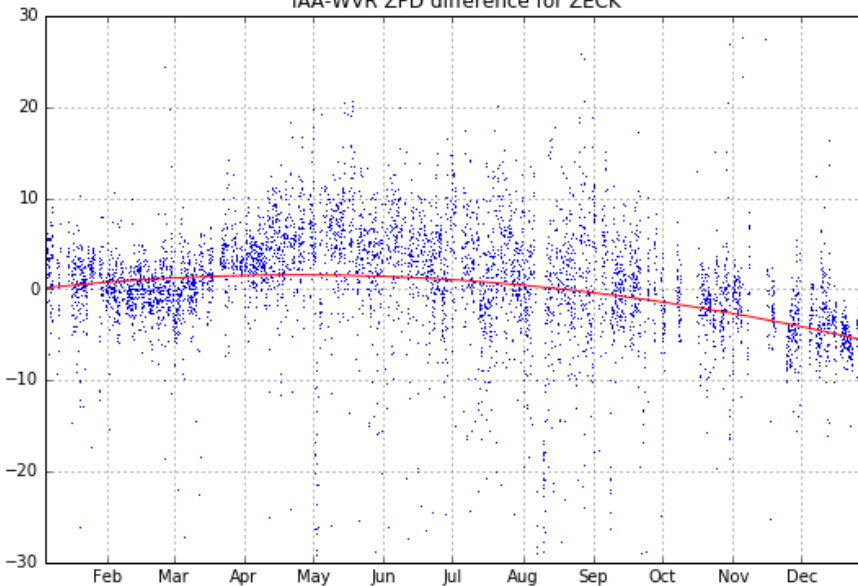


igs\_iaa  
rms: 5.6mm mean: -2.7mm  $\sigma$ : 4.9mm

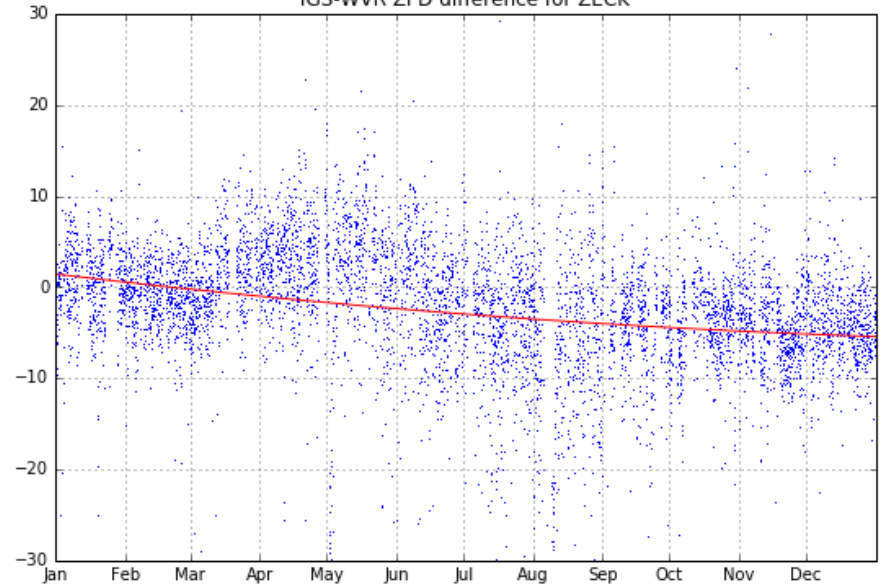
iaa\_wvr  
rms: 7.7mm mean: -0.0mm  $\sigma$ : 7.7mm

igs\_wvr  
rms: 8.1mm mean: -2.6mm  $\sigma$ : 7.7mm

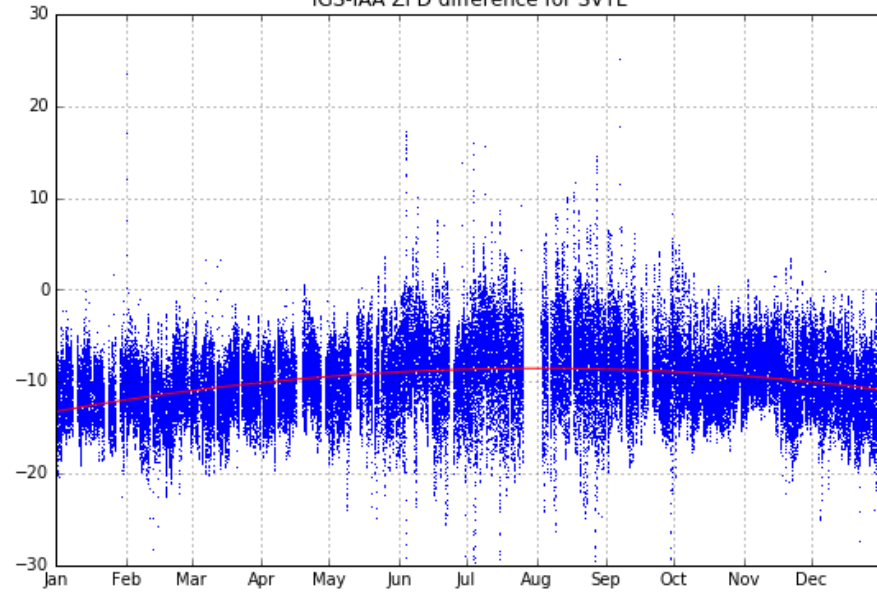
IAA-WVR ZPD difference for ZECK



IGS-WVR ZPD difference for ZECK



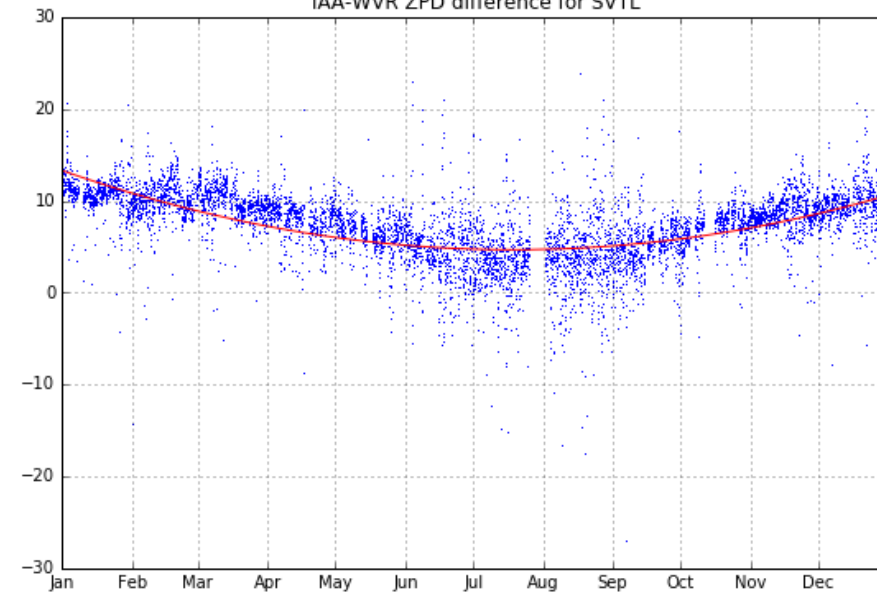
IGS-IAA ZPD difference for SVTL



`igs_iaa`

**rms: 10.6mm mean: -9.8mm  $\sigma$ : 4.0mm**

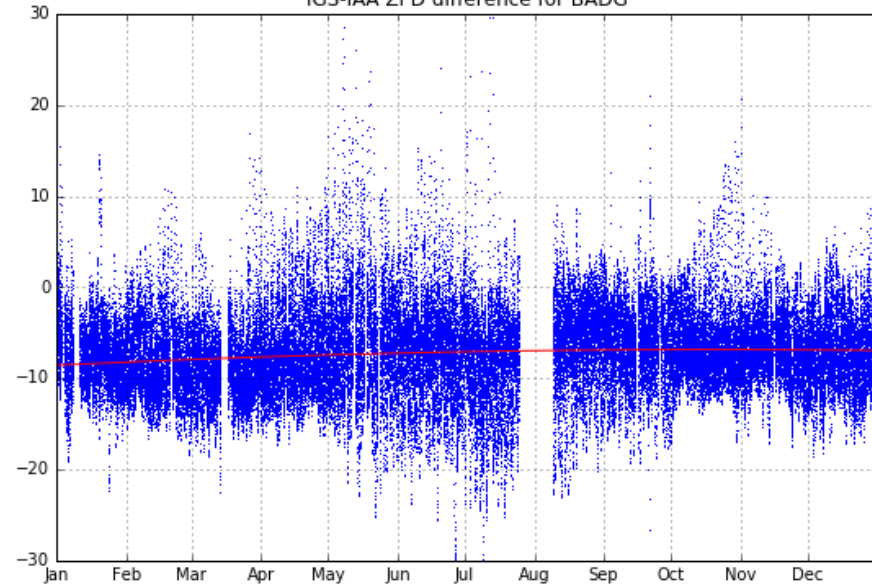
IAA-WVR ZPD difference for SVTL



`iaa_wvr`

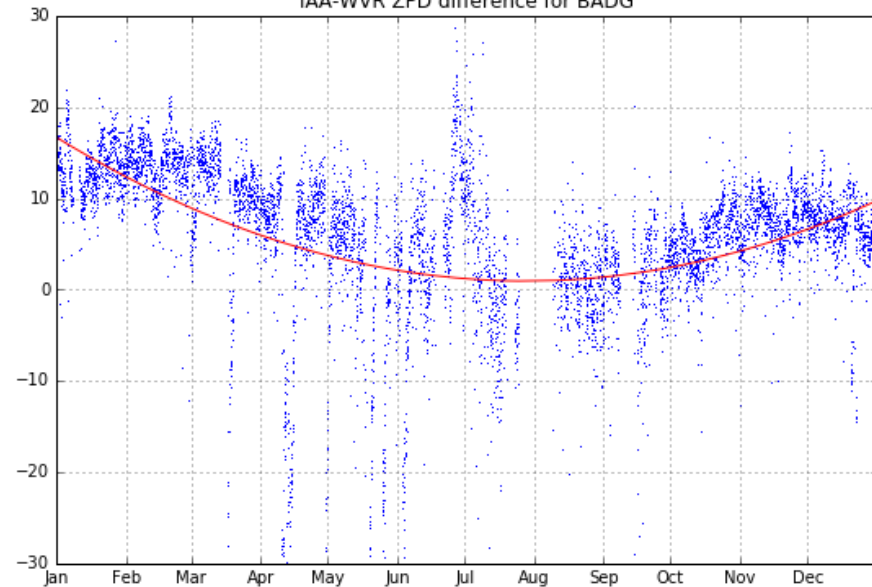
**rms: 8.1mm mean: 7.2mm  $\sigma$ : 3.8mm**

IGS-IAA ZPD difference for BADG



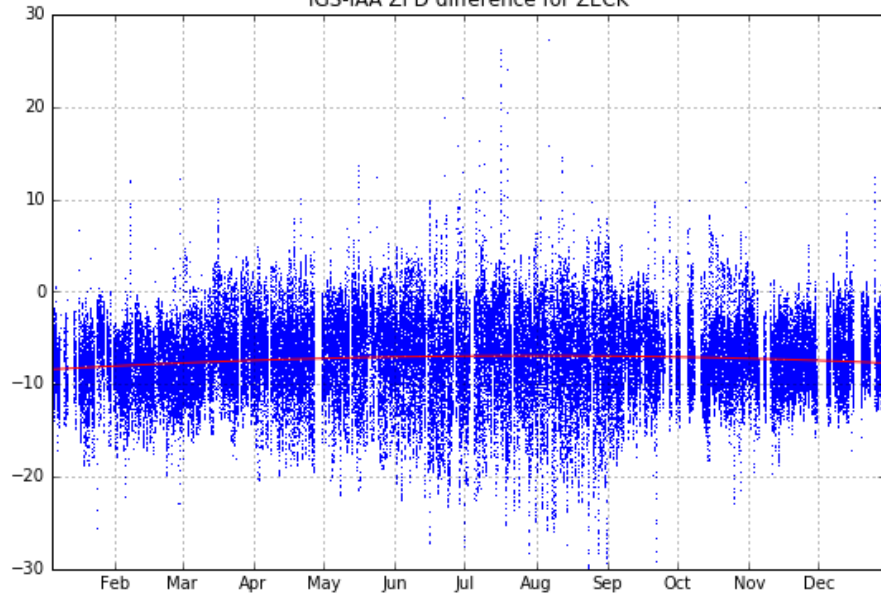
**igs\_iaa**  
**rms: 8.6mm mean: -7.3mm  $\sigma$ : 4.5mm**

IAA-WVR ZPD difference for BADG



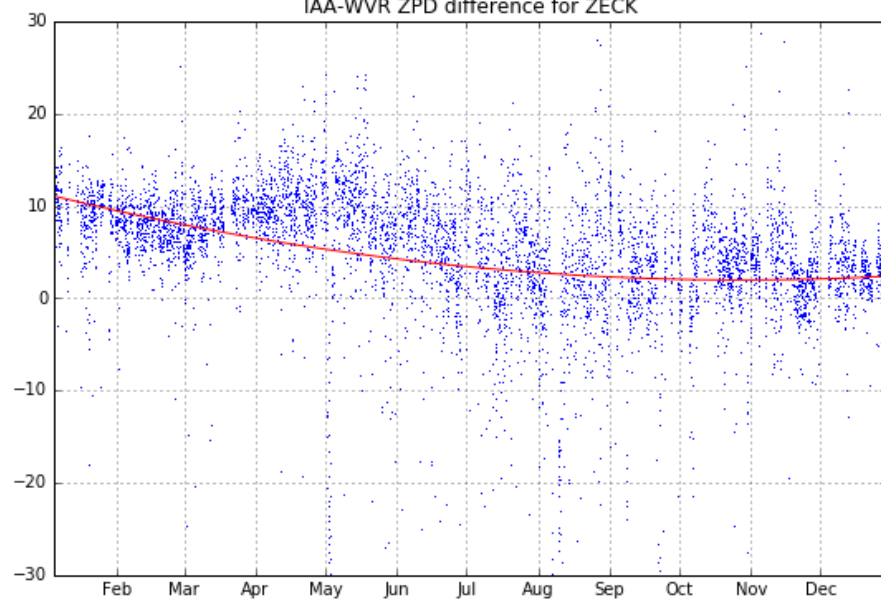
**iaa\_wvr**  
**rms: 10.3mm mean: 5.7mm  $\sigma$ : 8.6mm**

IGS-IAA ZPD difference for ZECK

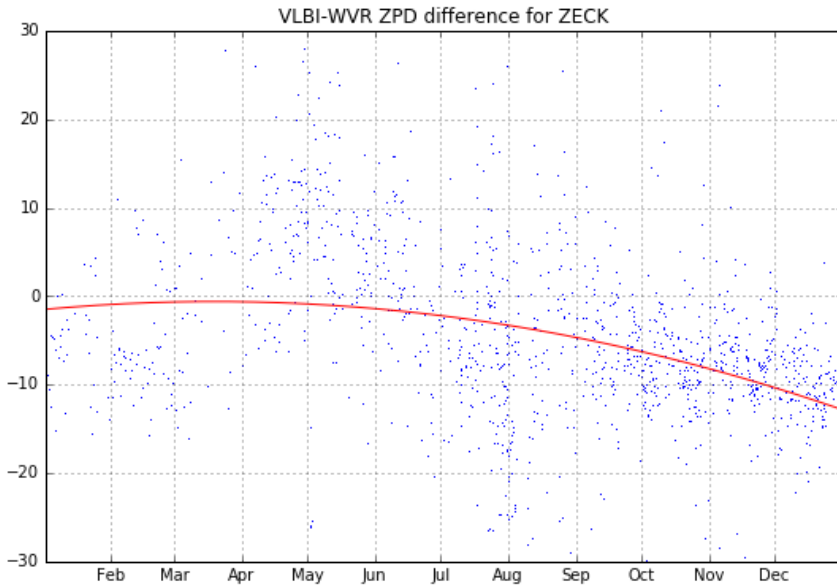


`igs_iaa`  
**rms: 8.5mm mean: -7.3mm  $\sigma$ : 4.3mm**

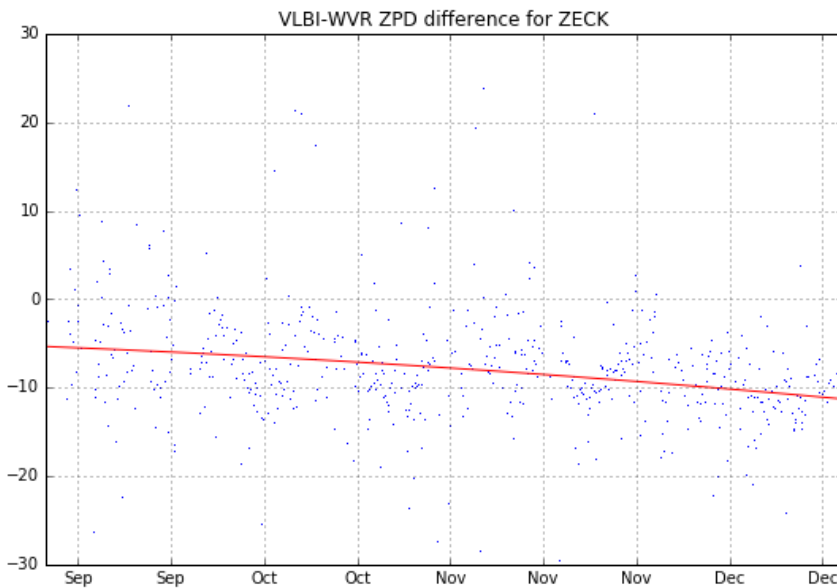
IAA-WVR ZPD difference for ZECK



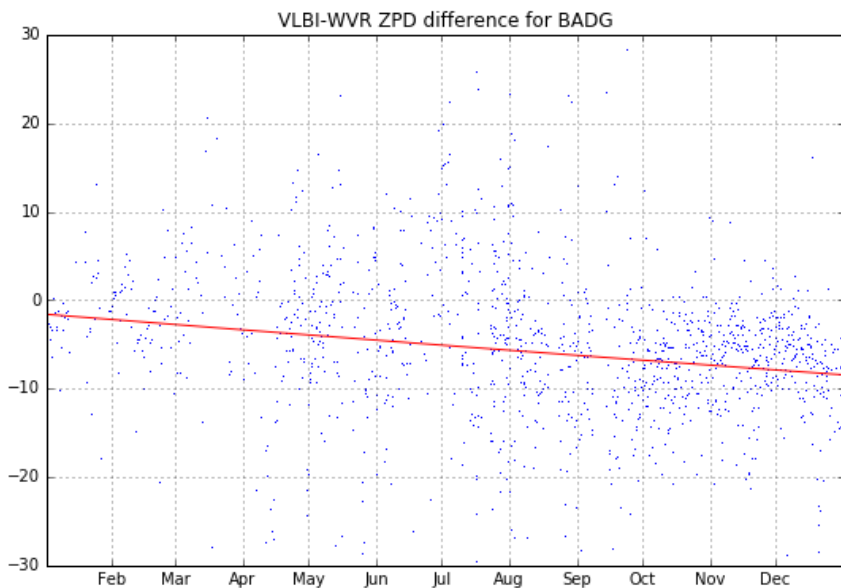
`iaa_wvr`  
**rms: 9.4 mm mean: 4.5 mm  $\sigma$ : 8.2mm**



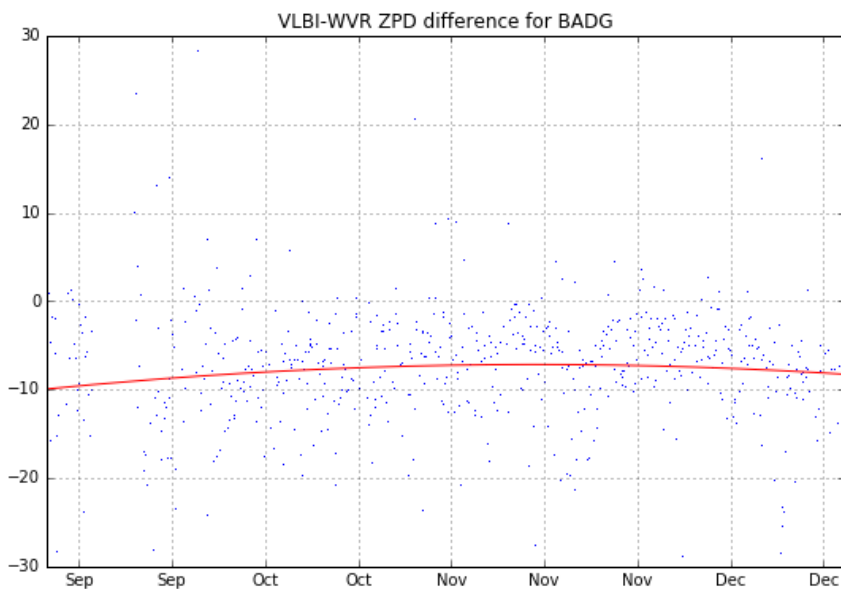
vlbi\_wvr  
rms: 12.6mm mean:-5.0mm  $\sigma$ : 11.6mm



vlbi\_wvr  
rms: 11.5mm mean:-8.0mm  $\sigma$ : 8.3mm



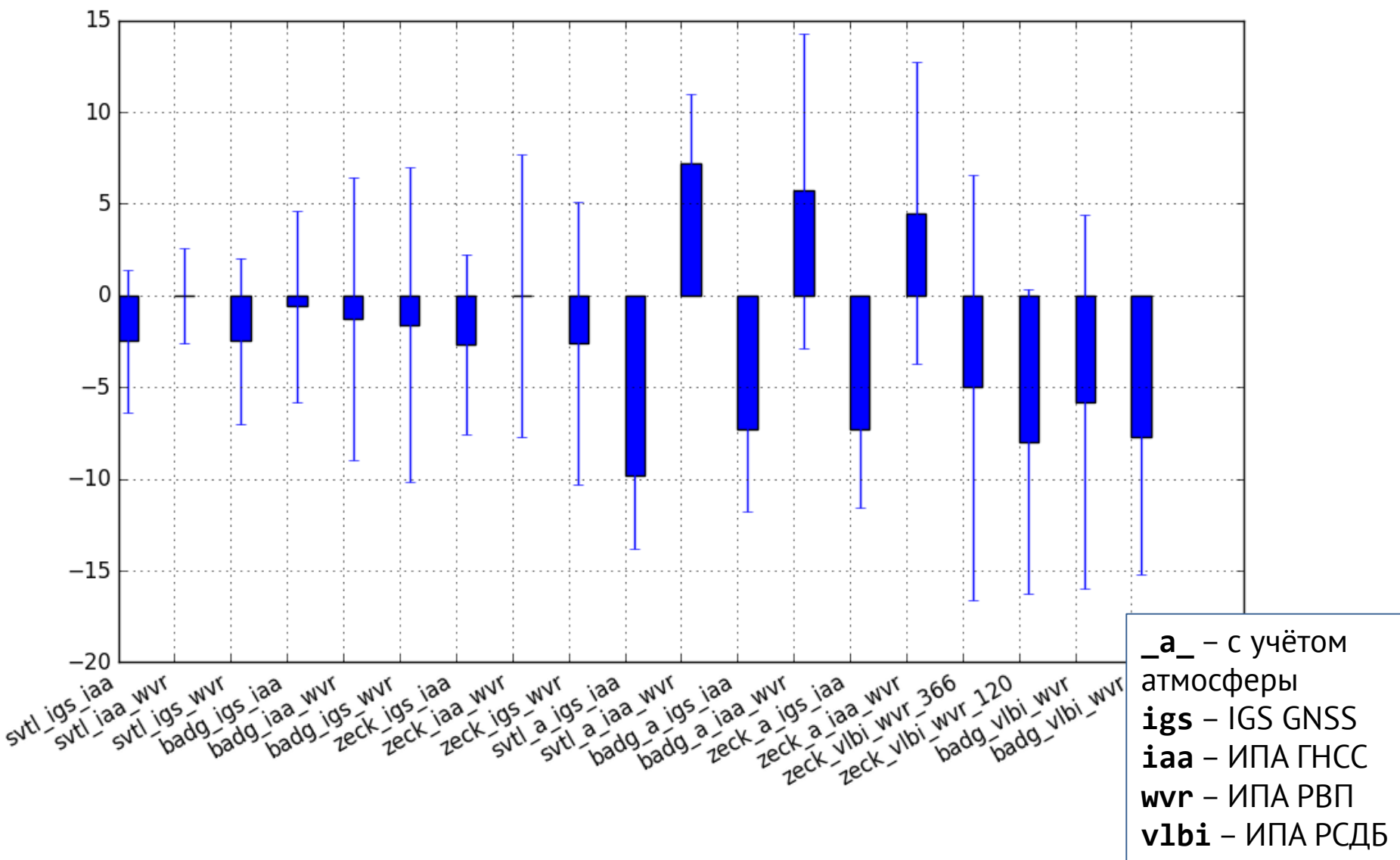
vlbi\_wvr  
rms: 11.7mm mean:-5.8mm  $\sigma$ : 10.2mm



vlbi\_wvr  
rms: 10.8mm mean:-7.7mm  $\sigma$ : 7.5mm



# Сравнение (систематические смещения и ошибки)



## Итоги:

- Все методы согласованы между собой на субсантиметровом уровне
- Наблюдаются сезонные изменения в систематических отклонениях и разбросе значений
- Калибровка РВП и отсечение выбросов остаётся вопросом для анализа.

## Необходимо в дальнейшем:

- Провести анализ существующих систематических разностей
- Провести анализ влияния выбираемых картирующих функций
- Провести и проанализировать раздельное определение влажной и сухой компонент.
- Провести сравнение с другими центрами обработки



**Спасибо!**