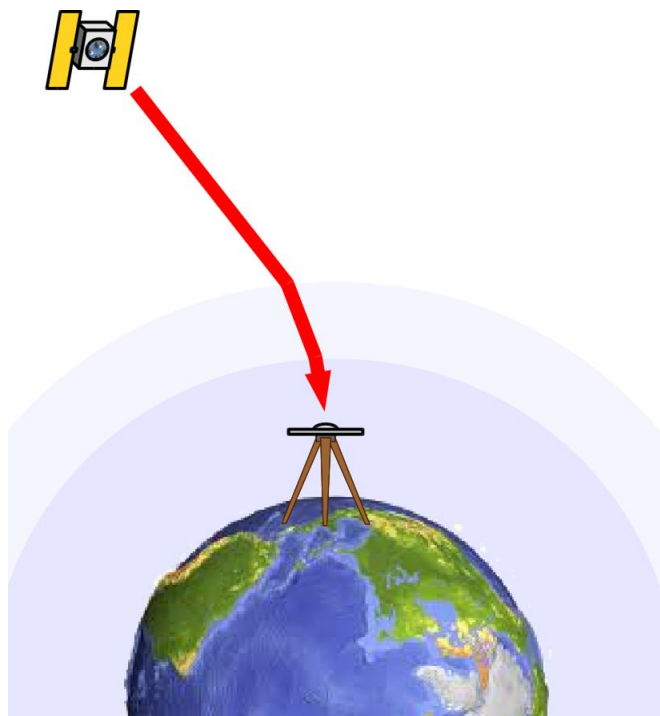


ГНСС-МОНИТОРИНГ ИНТЕГРАЛЬНОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В АТМОСФЕРЕ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Воротков М.В., Горшков В.Л., Гришина А.С., Щербакова Н.В.
Главная Астрономическая Обсерватория РАН, СПб



НАУЧНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГНСС

- > координатно-временное обеспечение
- > геодинамика, определение ПВЗ
- > высокоточный мониторинг ионизованной (TEC) и
- > **нейтральной атмосферы** (влажностное содержание IWV)

ПРЕИМУЩЕСТВА ГНСС-мониторинга атмосферы по сравнению с радиозондами, радиометрами и солнечными фотометрами:

- любое временное и пространственное разрешение
- независимость от калибровки => стабильность данных
- высокая точность и низкая стоимость
- всепогодность

ВОДЯНОЙ ПАР, наиболее вариабельный из всех параметров тропосферы, является важнейшей составляющей парникового газа. На долю водяного пара приходится основная часть поглощенной радиации. Точные данные о его временном и пространственном распределении важны для метеорологии, численного моделирования погоды и климата.

Парниковый газ	Вклад (%)
Водяной пар	36 — 72
Углекислый газ	9 — 26
Метан	4 — 9
Озон	3 — 7

ВЫЧИСЛЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ (что и как определяется)

Задержка ГНСС-сигнала (**STZ**) при распространении через нейтральную атмосферу приводится к зениту с помощью картирующей функции **$STZ \cdot m(z, P, B, DoY, \dots)$** и называется тропосферной зенитной задержкой **$ZTD = ZHD + ZWD$** (гидростатическая и влажная; вычисляются в пакете GIPSY).

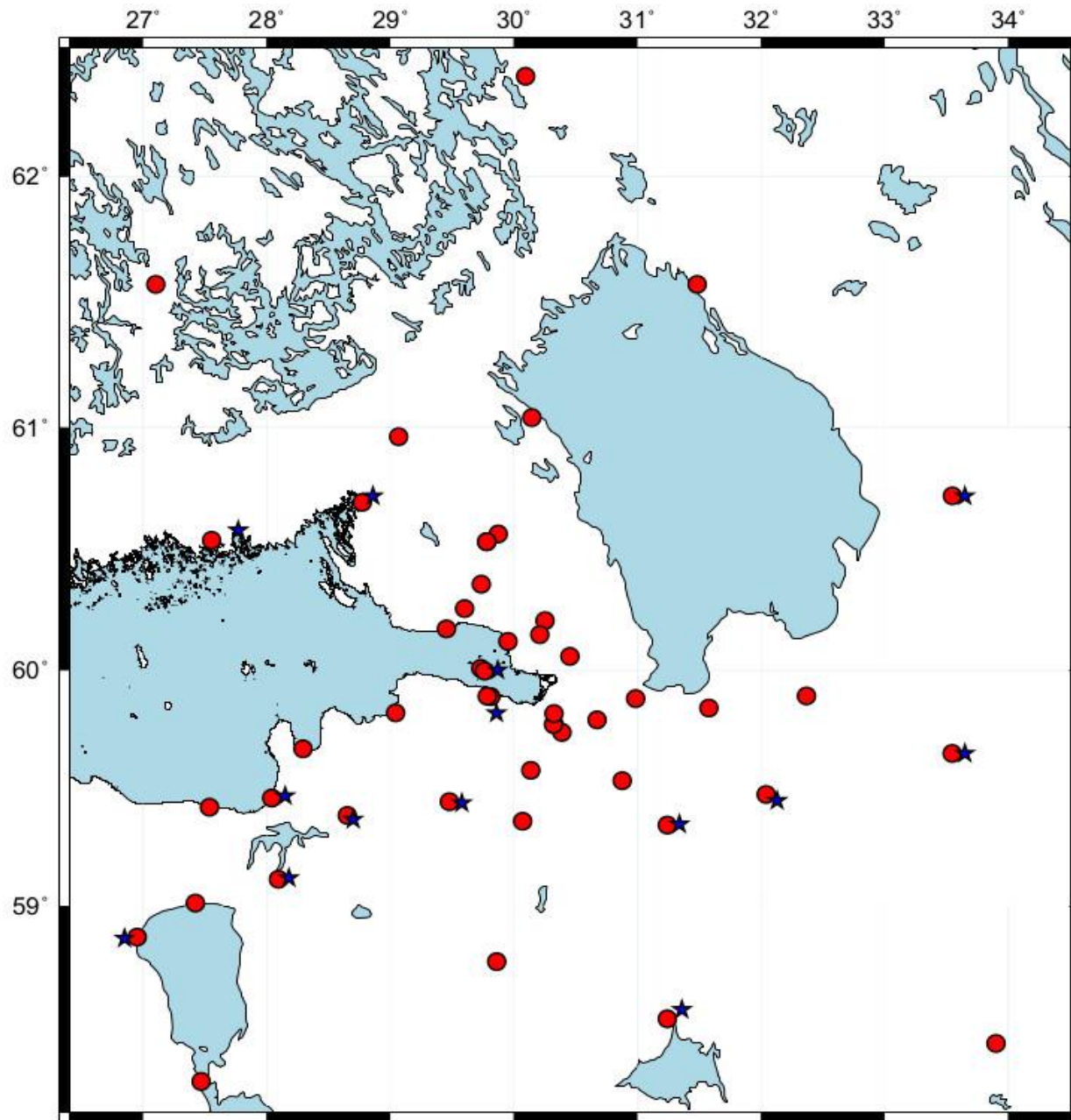
ZHD хорошо моделируется поверхностными барометрическими измерениями в месте приема сигнала (например, по модели Саастамойнена, являющейся следствием уравнения статики атмосферы):

$$ZHD = 0.22767 P_s / (1 - 0.00266 \cos 2B - 0.00028H).$$

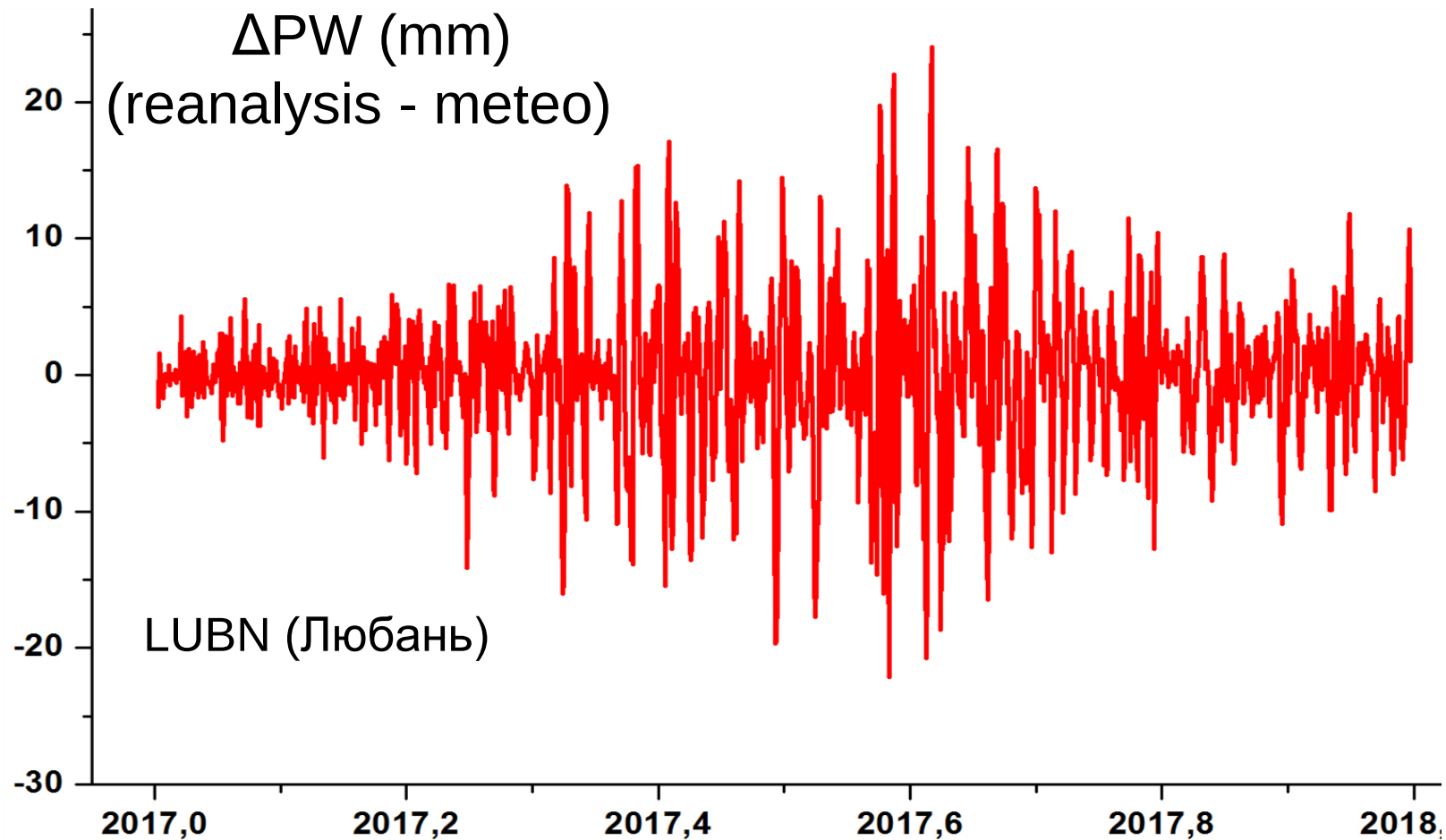
B, **H** – широта и высота ГНСС-станции, **P_s** – поверхностное давление либо по метеоданным на станции (если есть рядом), либо по глобальной численной модели метеорологических полей NCEP/NCAR Reanalysis (1-2).

$ZWD = ZTD - ZHD$ в пункте наблюдения зависит от содержания атмосферного водяного пара в тропосфере и позволяет выявить его суммарное количество **IWV [кг]** и количество осаждаемой воды **PW [мм] = IWV / ρ_w = $ZWD / (0.10631 + 1733 / T_m)$** , где **$T_m [K] = 50.4 + 0.789 T_s$** , **$T_m$** – средняя температура столба тропосферы (модель Мендеса), **T_s** – поверхностная температура, **ρ_w** – плотность воды.

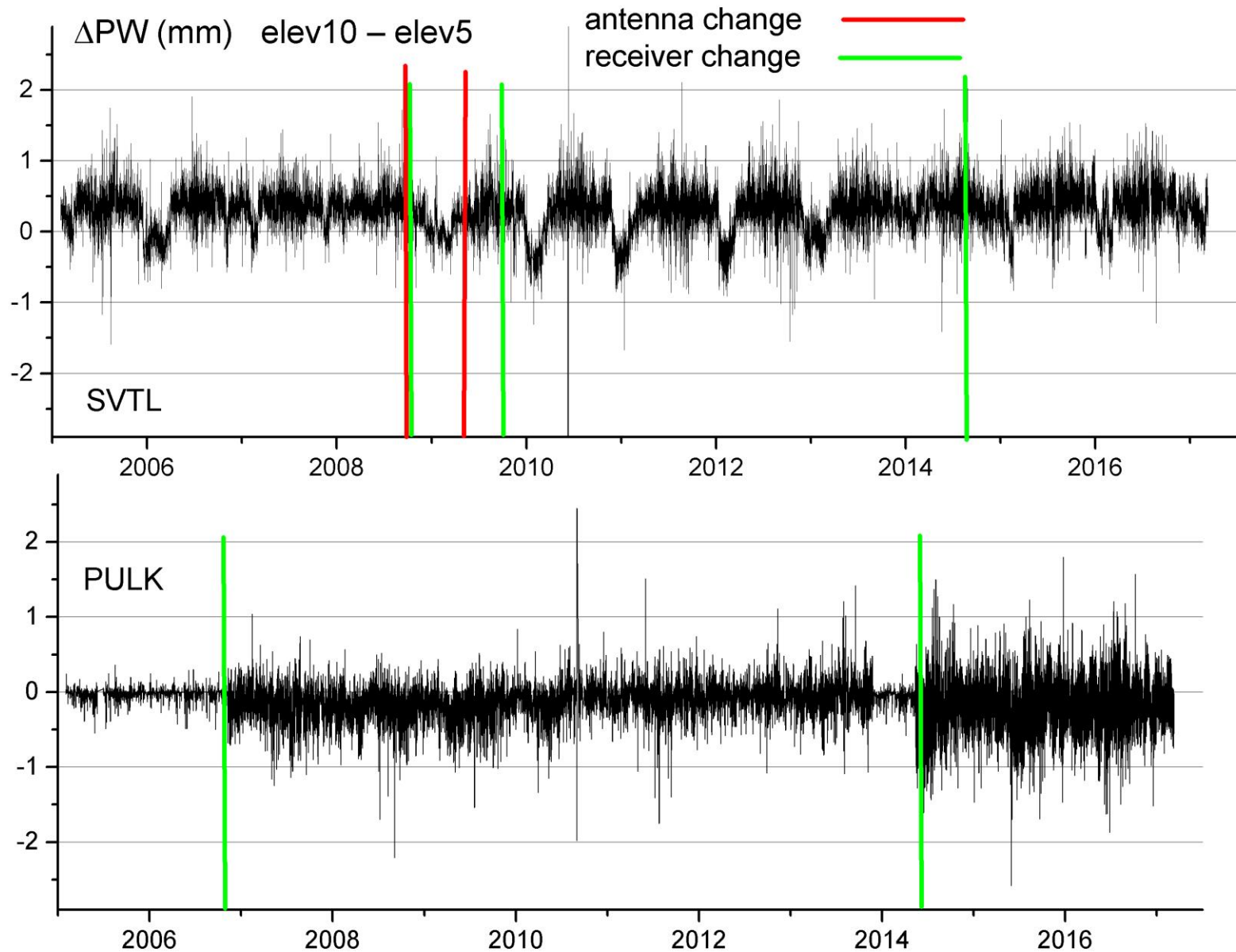
КАРТА ГНСС● (50) и МЕТЕО★(14) СТАНЦИЙ



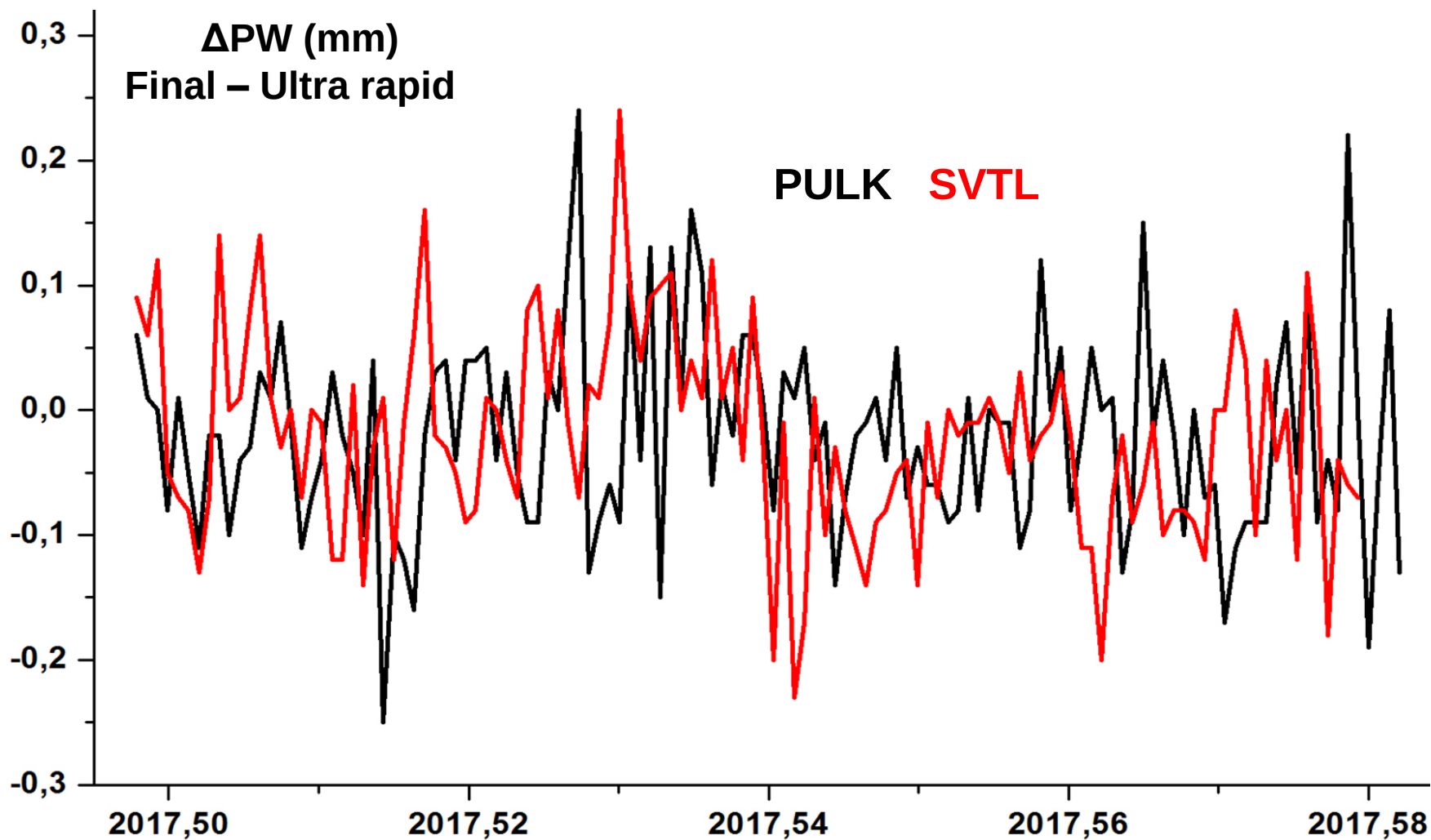
СРАВНЕНИЕ PW ПО ДАННЫМ С МЕТЕОСТАНЦИЙ И ПО ГЛОБАЛЬНОЙ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ



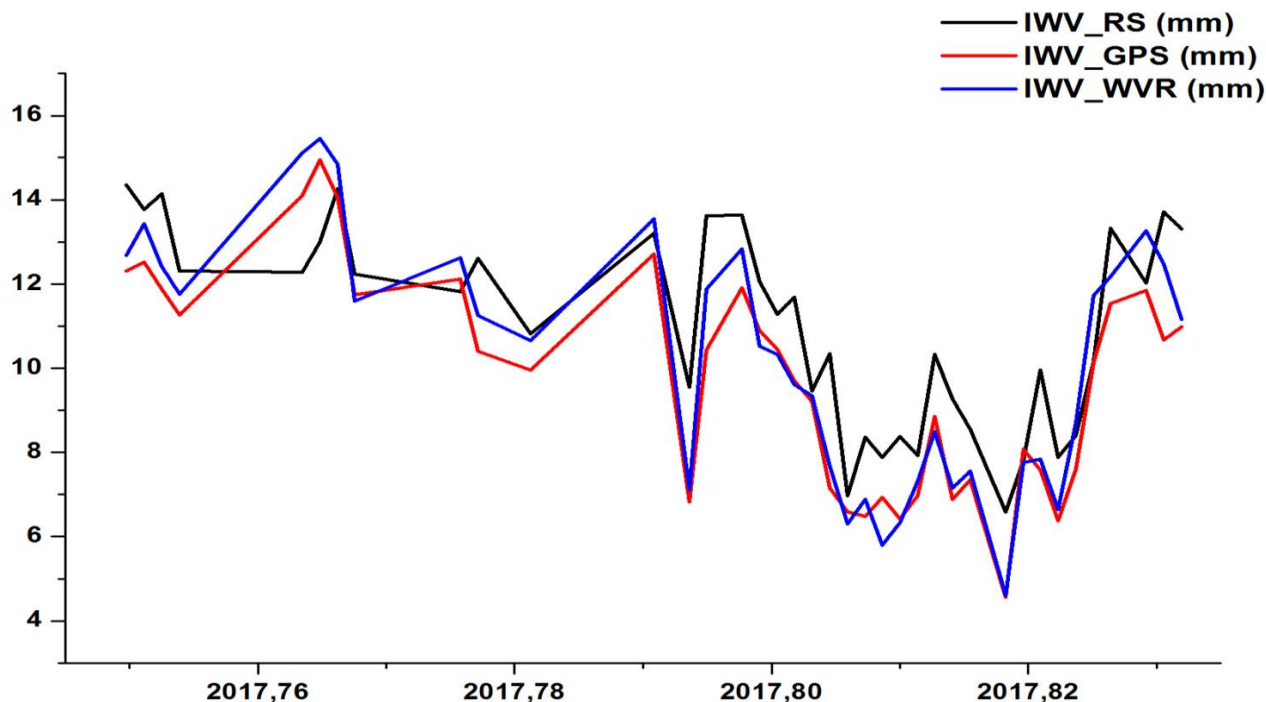
ВЛИЯНИЕ НА PW ОТСЕЧКИ СПУТНИКОВ ПО ВЫСОТЕ



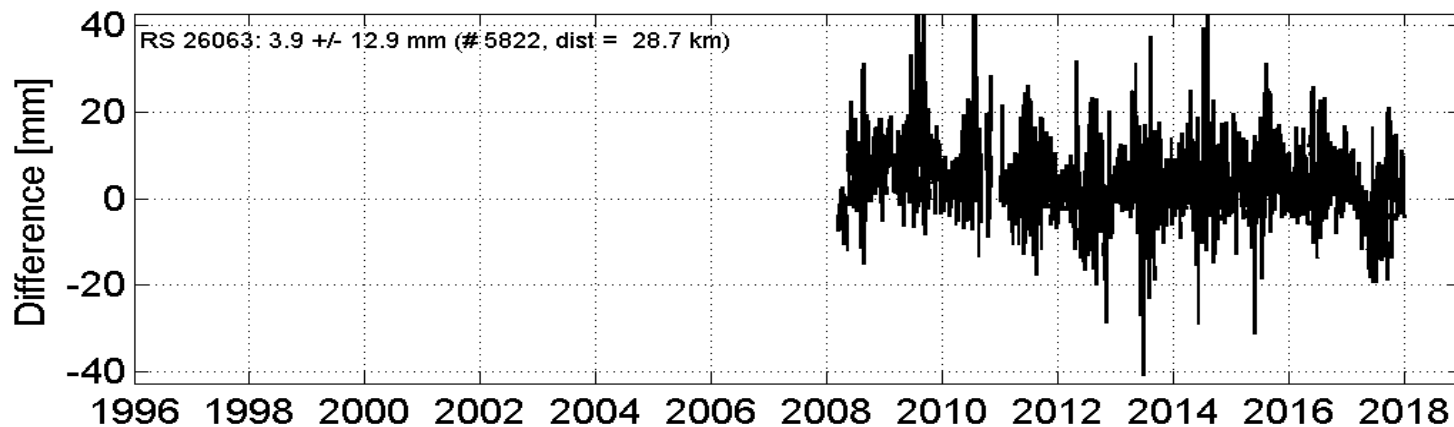
ВЛИЯНИЯ НА PW ОРБИТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ



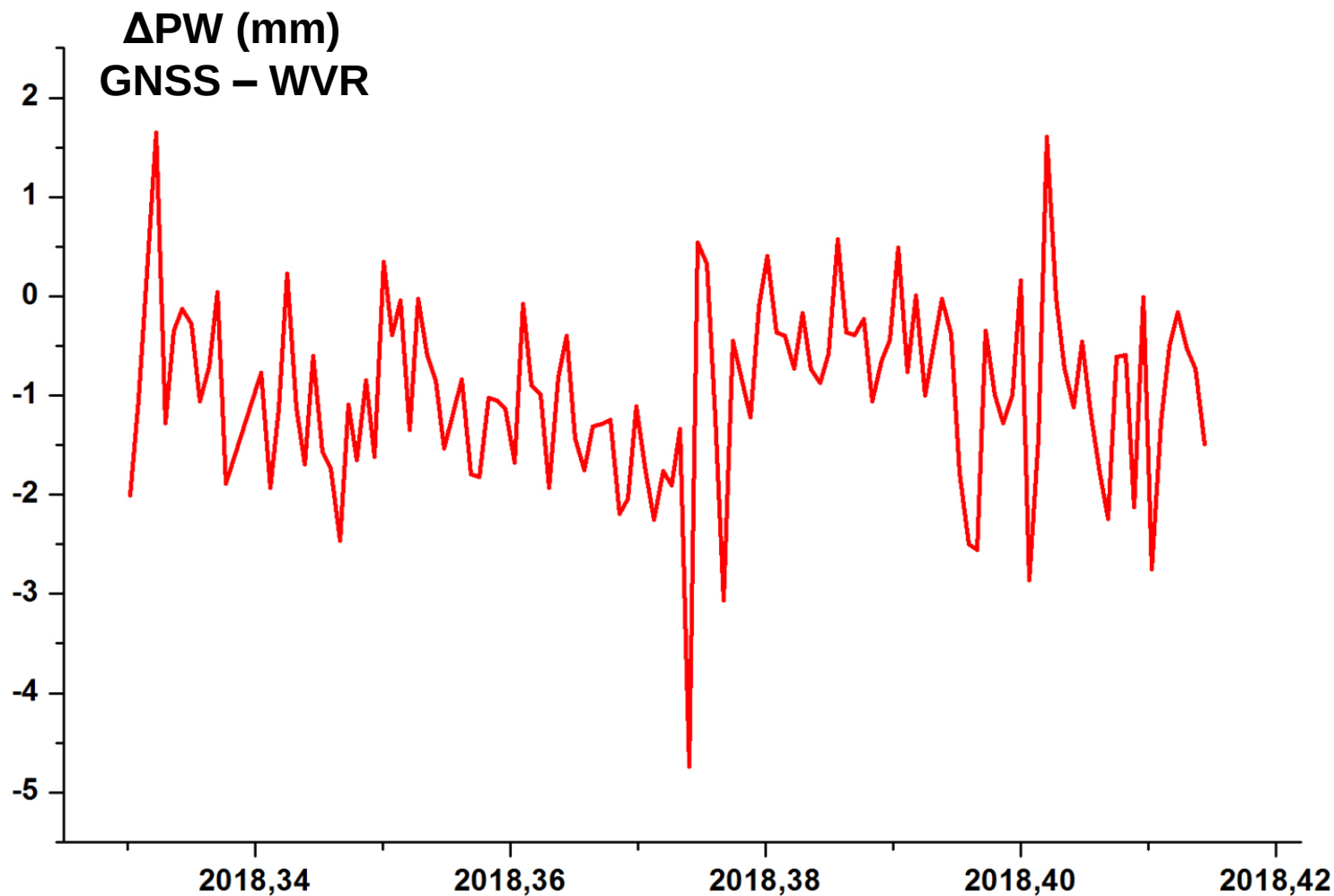
СРАВНЕНИЕ ГНСС-ОЦЕНОК PW С АНАЛОГИЧНЫМИ ДАННЫМИ РАДИОМЕТРА WVR (СВЕТЛОЕ) И РАДИОЗОНДА RS (ВОЕЙКОВО)



ZPD difference Radiosonde minus EUR for PULK



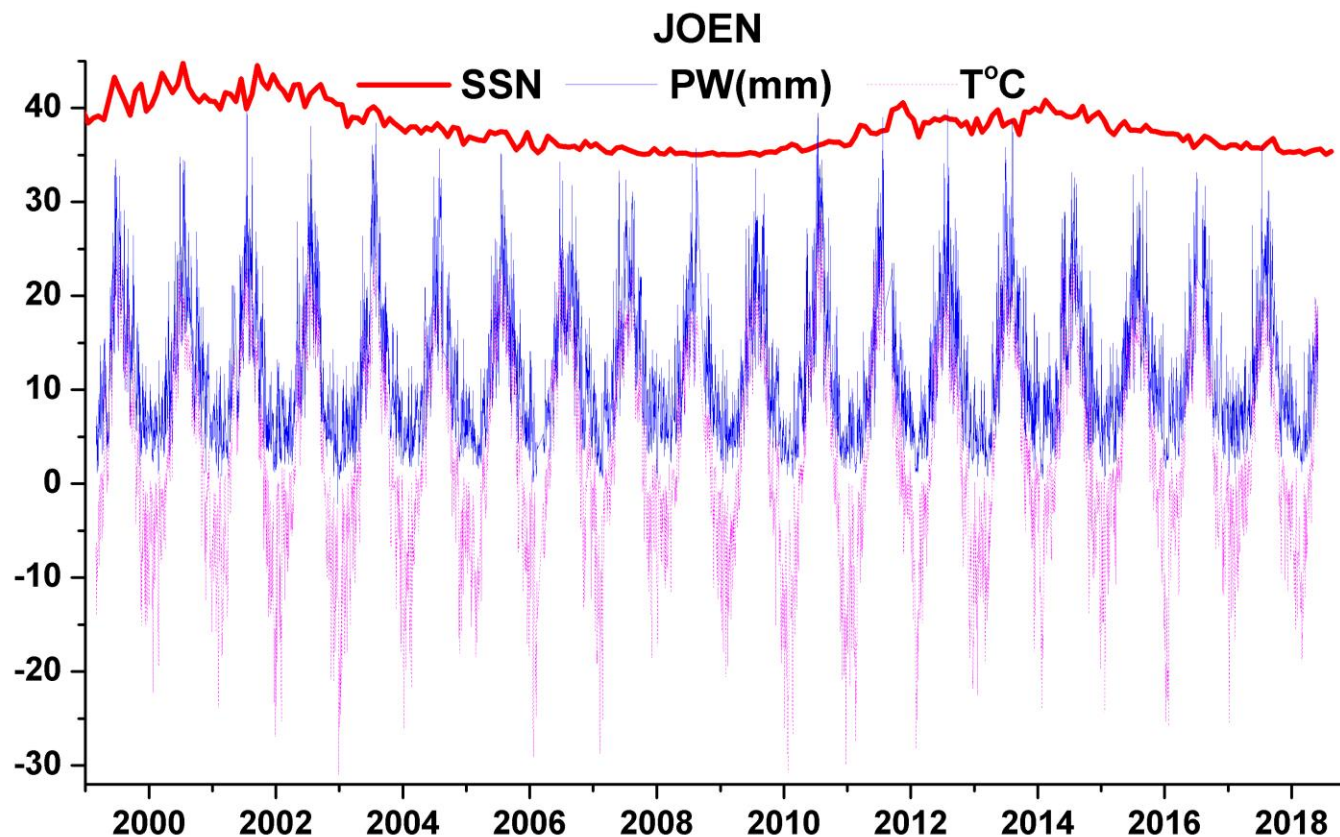
СРАВНЕНИЕ ГНСС-ОЦЕНОК **PW** С АНАЛОГИЧНЫМИ ДАННЫМИ РАДИОМЕТРА WVR (СВЕТЛОЕ)



ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫЕ РЯДЫ НАБЛЮДЕНИЙ (разрешение 6 часов)

Вариации Аллана $\sigma_A = \pm 7 \text{ мм}$

$$\sigma_A = \sqrt{\Sigma(x_i - x_{i+1})^2 / (2(N-1))}$$

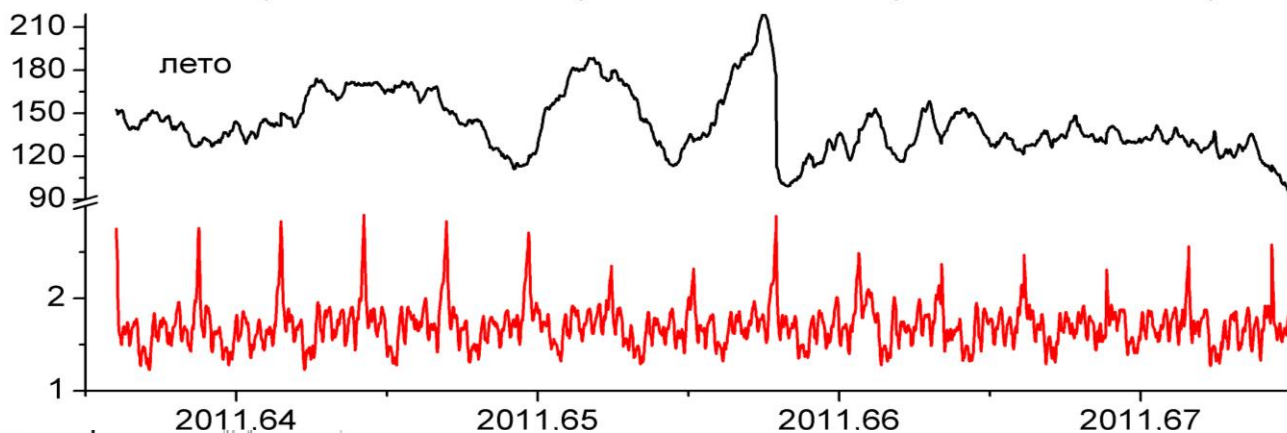
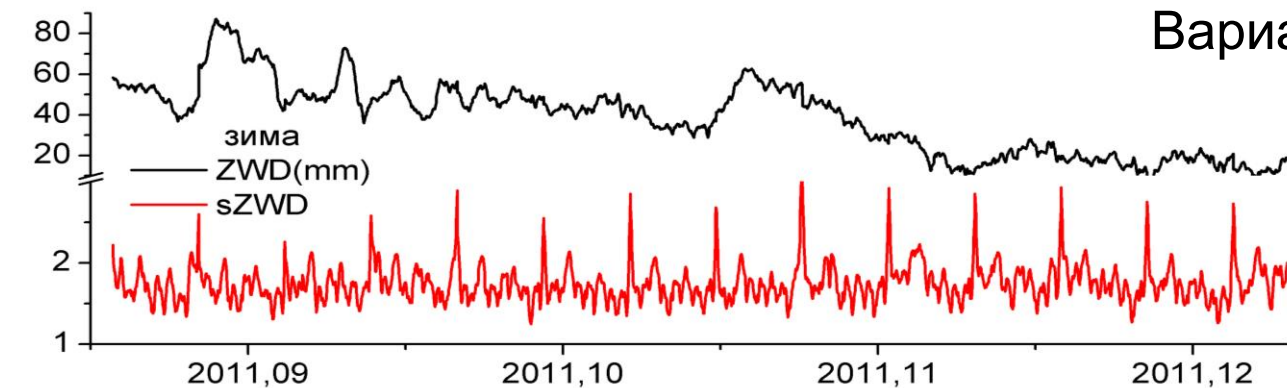


Пункт	Тренд	ΔT
ГНСС (мм/10лет)	(год)	
METS	.00 ± .01	26
RIGA	.55 .01	24
SVTL	.07 .01	21
JOEN	-.10 .02	19
PULK	.30 .02	16

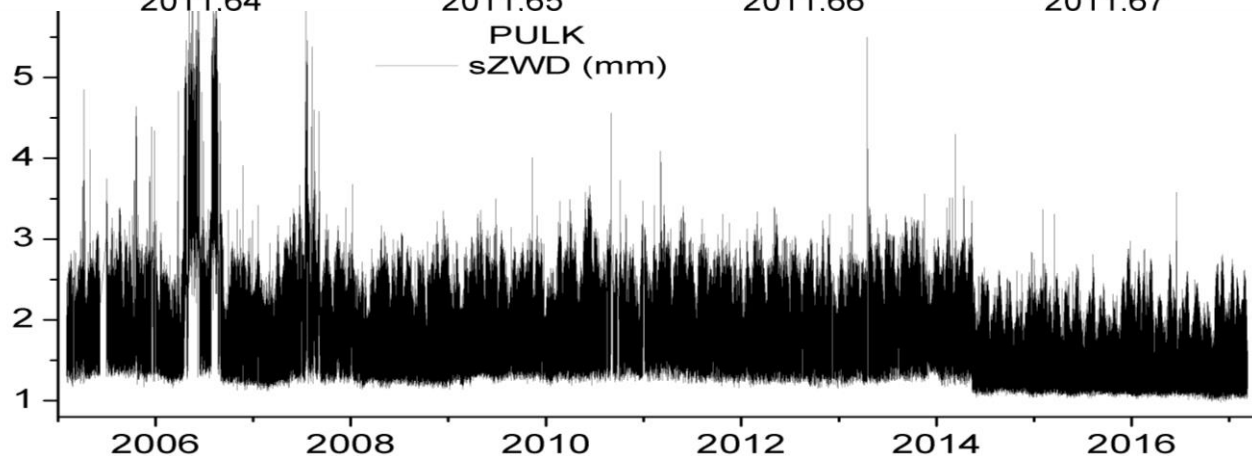
World GNSS-ZWD
 0.32 ± 0.01
(2015)

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ВАРИАЦИИ PW (разрешение 5 минут)

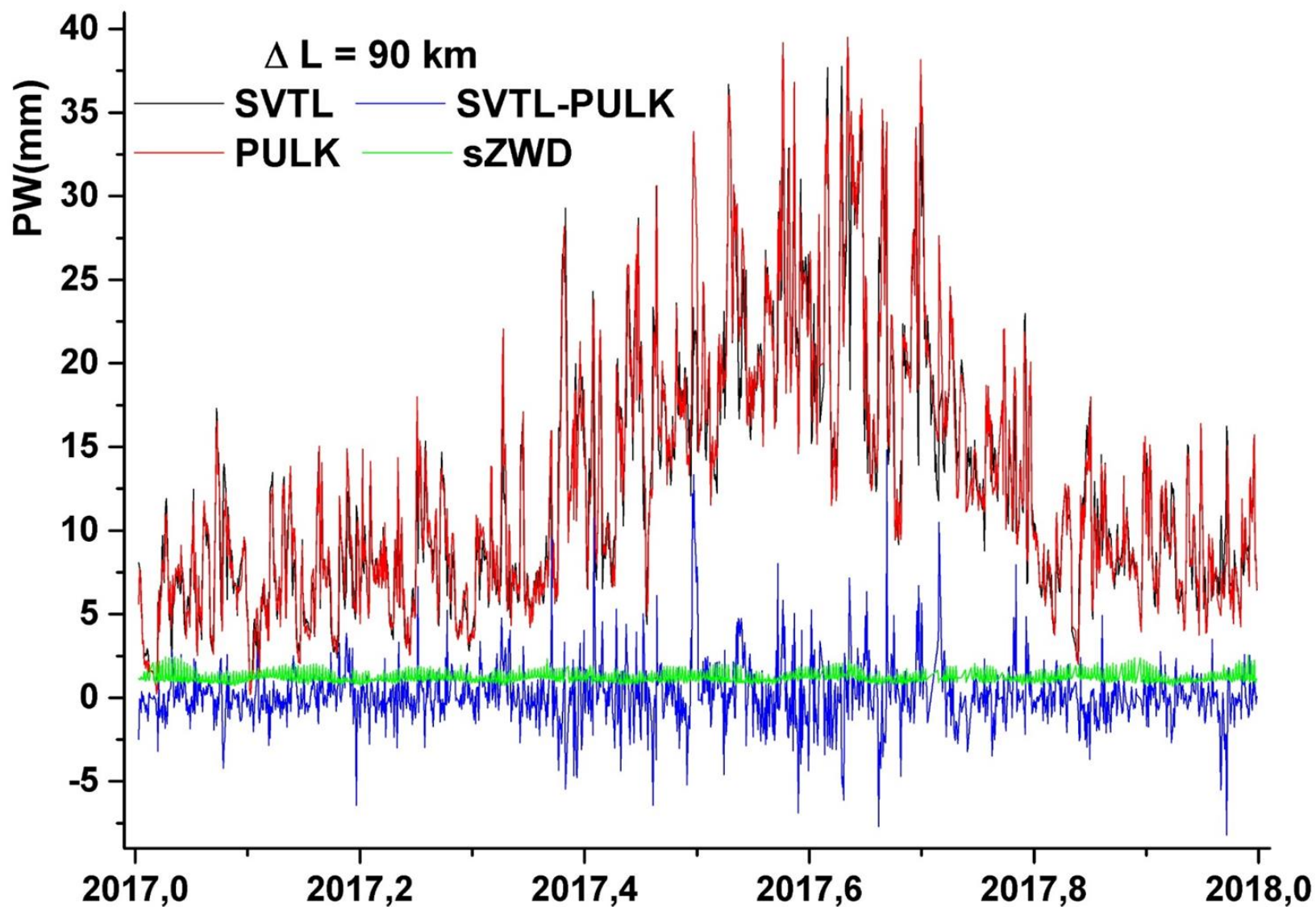
Вариации Аллана ± 0.53 мм



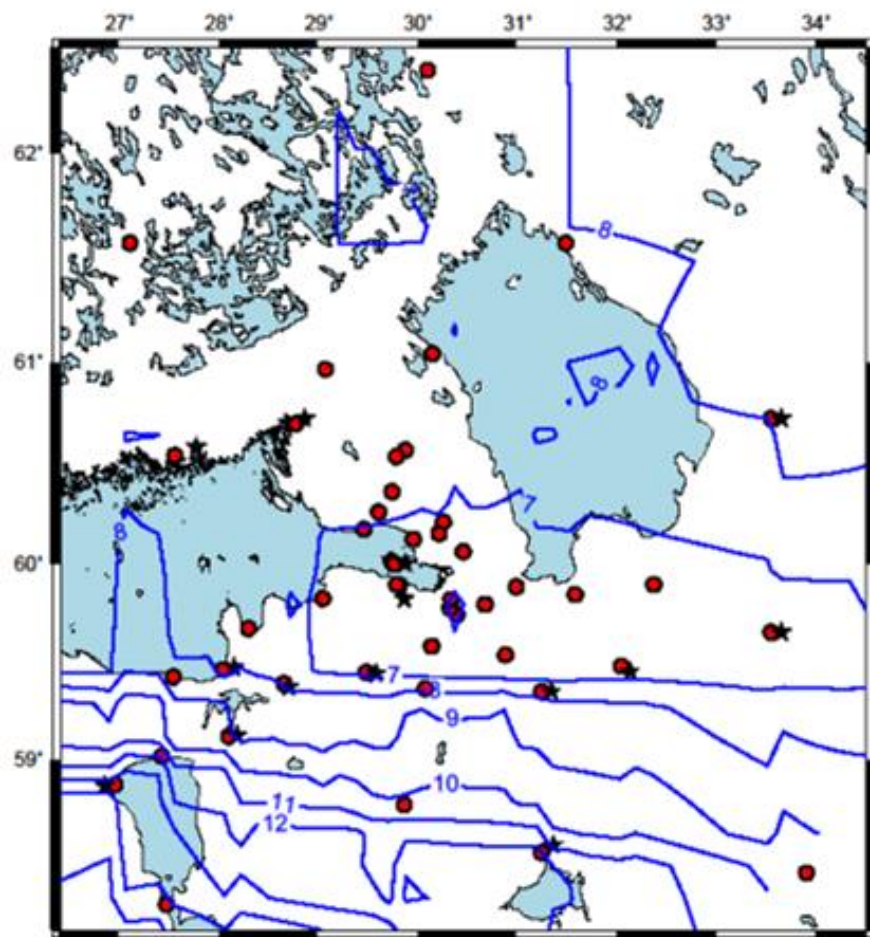
SSA PW за 2011 год	
период (дни)	амплитуда (мм)
1	>1
3-4	~ 3
7-8	~ 2
14-20	3 – 4



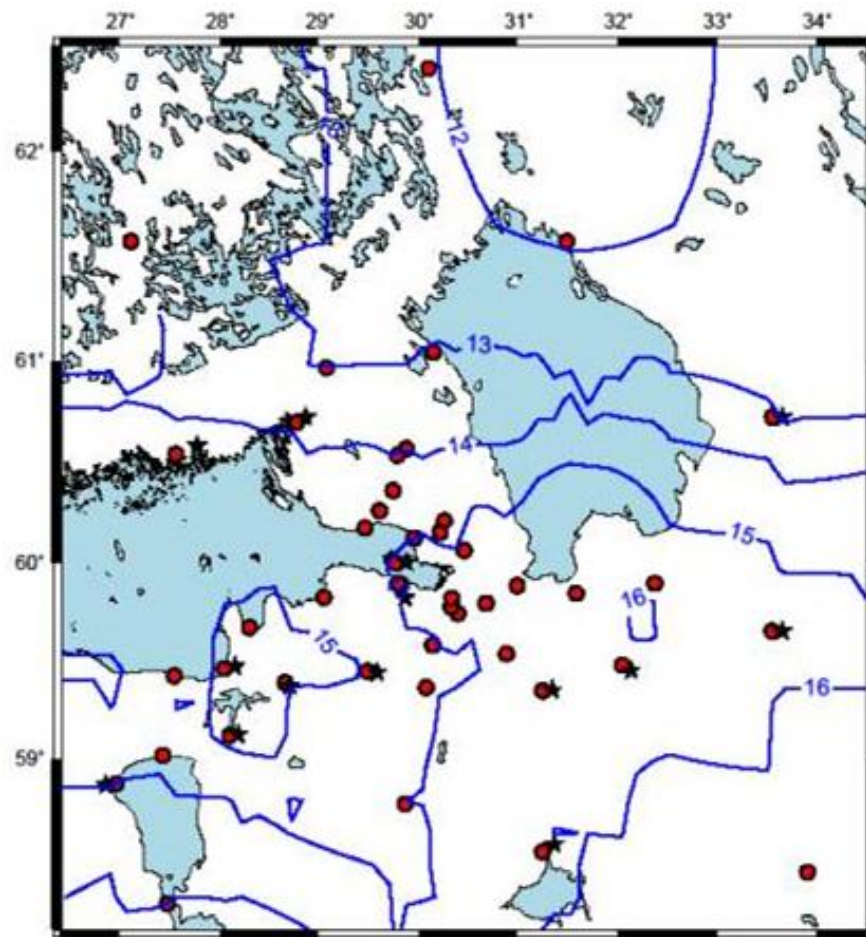
НАБЛЮДЕНИЯ 2017 ГОДА НА 51 СТАНЦИИ ЛЕНОБЛАСТИ



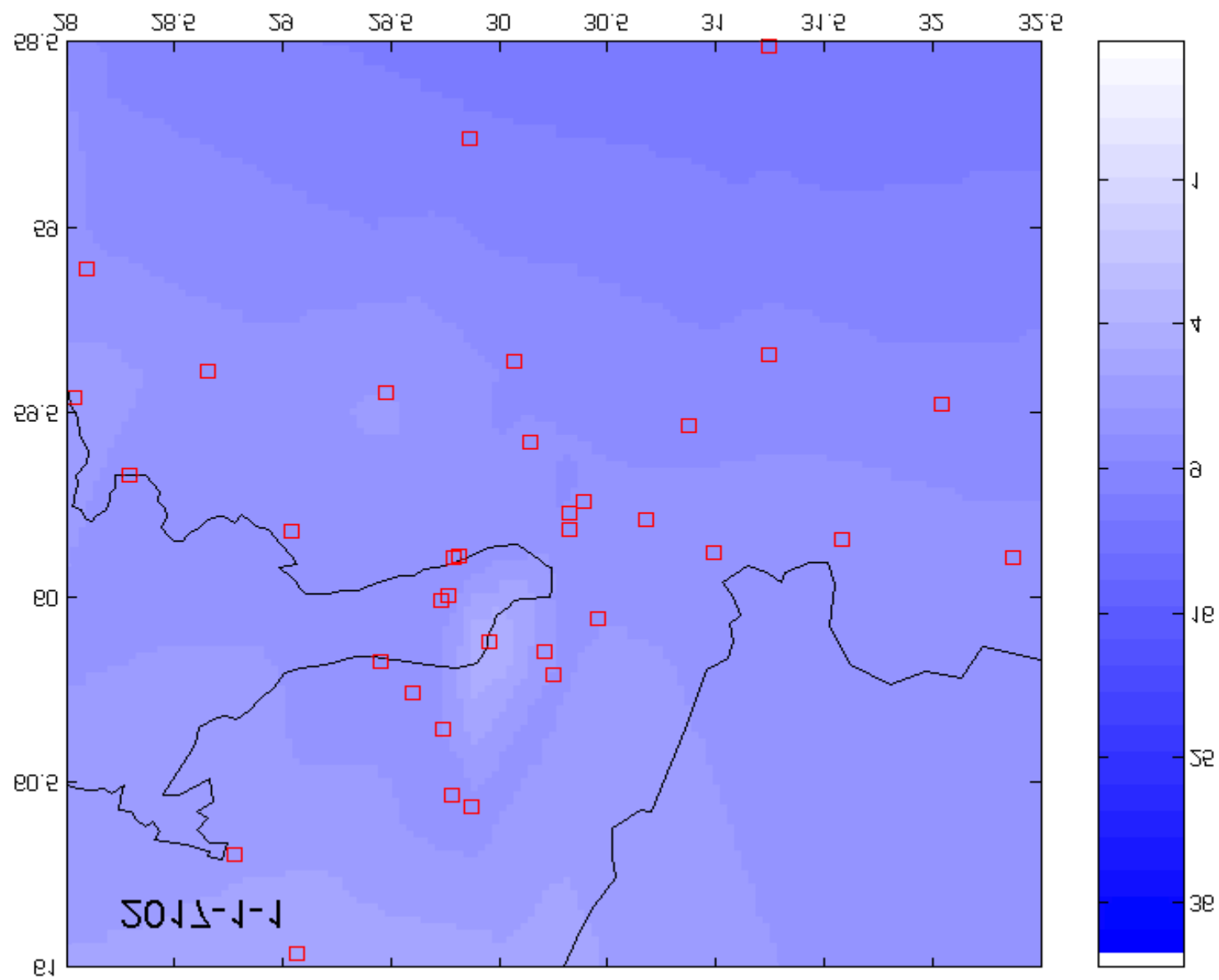
изолинии поля $PW(\text{mm})$ на территории ЛО



1.01.2017 00:00 UT



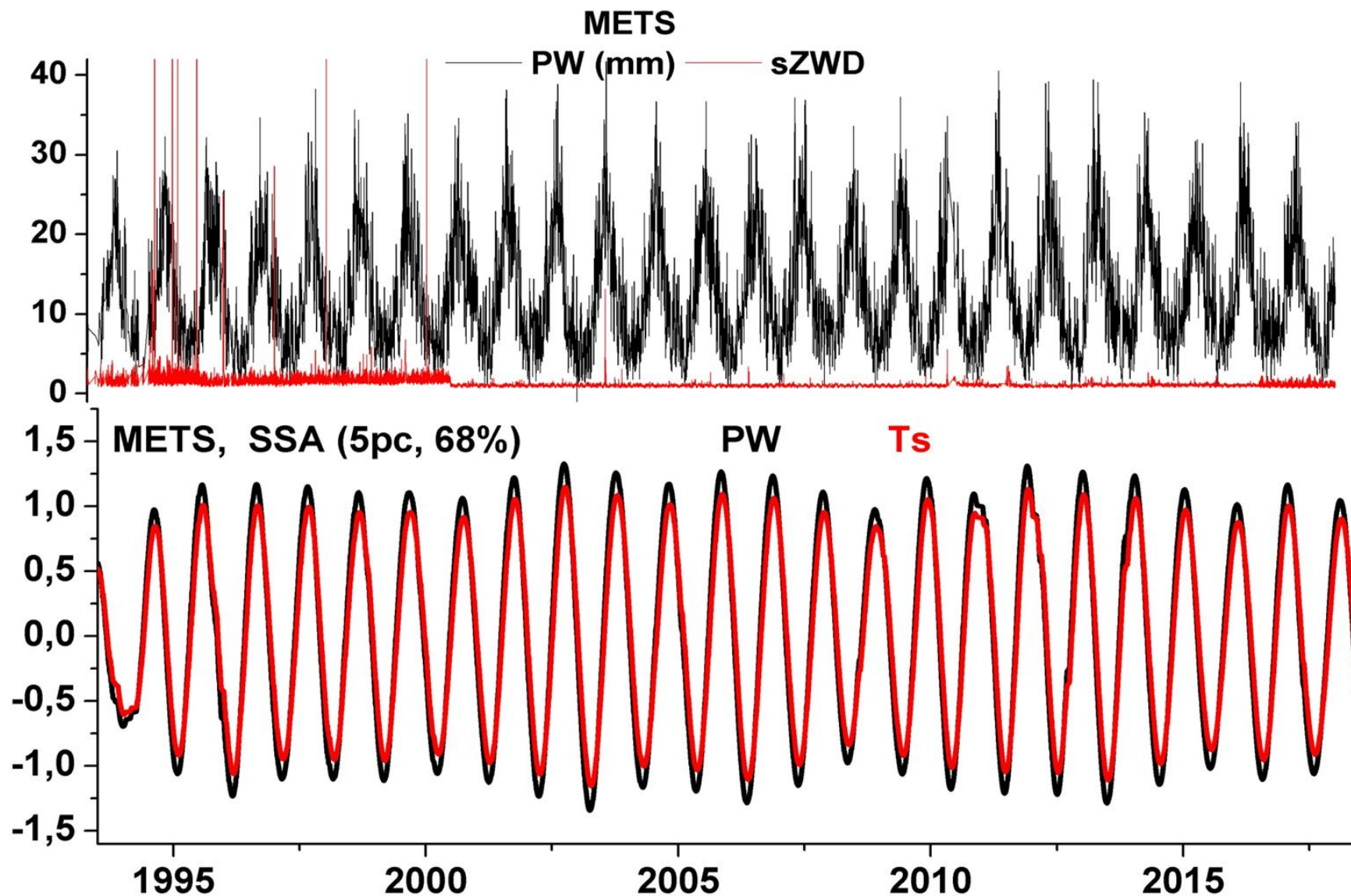
22.06.2017 00:00 UT



СПАСИБО
за внимание

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫЕ РЯДЫ НАБЛЮДЕНИЙ (разрешение 6 часов)

Вариации Аллана ± 7 мм



Hopfield Hydrostatic Delay Model

$$\begin{aligned}
 \text{ZHD} &= 1.552 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\text{K}}{\text{hPa}} \right] \cdot \frac{p_0}{T_0} \cdot \left(40136 [\text{m}] + 148.72 \left[\frac{\text{m}}{\text{K}} \right] \cdot T_0 \right) \\
 &= \left(0.62291 \left[\frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{hPa}} \right] \cdot \frac{1}{T_0} + 0.0023081 \left[\frac{\text{m}}{\text{hPa}} \right] \right) \cdot p_0
 \end{aligned}$$

Saastamoinen Hydrostatic Delay Model

$$\text{ZHD} = [0.0022779 \text{ m/mbar}] P_0 f(\phi, h)$$

$$\begin{aligned}
 \text{ZHD} &= \frac{0.022275 \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{hPa}} \right] \cdot p_0}{9.784 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot \left(1 - 0.00266 \cdot \cos 2\phi - 0.00028 \left[\frac{1}{\text{km}} \right] \cdot h \right)} \\
 &= \frac{0.0022767 \left[\frac{\text{m}}{\text{hPa}} \right] \cdot p_0}{1 - 0.00266 \cdot \cos 2\phi - 0.00028 \left[\frac{1}{\text{km}} \right] \cdot h}
 \end{aligned}$$

MOPS Hydrostatic Delay Model

$$ZHD_0 = 10^{-6} \cdot k_1 \cdot \frac{R_d \cdot p}{g_m}$$

$$k_1 = 77.604 \text{ K hPa}_1$$

$$R_d = 287.054 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$g_m = 9.784 \text{ m/s}_2 \text{ (effective gravity)}$$

$$ZHD = ZHD_0 \cdot \left(1 - \frac{\beta \cdot H}{T}\right)^{\frac{g}{R_d \cdot \beta}}$$

Hopfield Wet Delay Model

$$ZWD = 0.07402 \left[\frac{\text{K}^2}{\text{hPa}} \right] \cdot \frac{e_0}{T_0^2} \cdot H_T$$

$$= 0.07402 \left[\frac{\text{K}^2}{\text{hPa}} \right] \cdot \frac{e_0}{T_0^2} \cdot \left[7508 [\text{m}] + 0.002421 [\text{m}] \cdot \exp\left(\frac{t_0}{22.90 [^{\circ}\text{C}]}\right) \right]$$

$$= \left(555.7 \left[\frac{\text{m} \cdot \text{K}^2}{\text{hPa}} \right] + 1.792 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{m} \cdot \text{K}^2}{\text{hPa}} \right] \cdot \exp\left(\frac{t_0}{22.90 [^{\circ}\text{C}]}\right) \right) \cdot \frac{e_0}{T_0^2}$$

Ifadis Wet Delay Model

$$ZWD = 0.554 \cdot 10^{-2} \text{ [m]} - 0.880 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{m}}{\text{hPa}} \right] \cdot (p - 1000) \\ + 0.272 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{m}}{\text{hPa}} \right] \cdot e + 2.771 \left[\frac{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{hPa}} \right] \cdot \frac{e}{T}$$

Mendes Wet Delay Model

$$ZWD = 0.122 \text{ [m]} + 0.00943 \left[\frac{\text{m}}{\text{hPa}} \right] \cdot e$$

MOPS Wet Delay Model

$$ZWD = \frac{10^{-6} \cdot k_3 \cdot R_d}{g_m \cdot (\lambda + 1) - \beta \cdot R_d} \cdot \frac{e}{T}$$

$$k_1 = 77.604 \text{ K hPa}_{-1}$$

$$k_3 = 382000 \text{ K}_2 \text{ hPa}_{-1} ($$

$$R_d = 287.054 \text{ J kg}_{-1} \text{ K}_{-1}$$

$$g_m = 9.784 \text{ m s}_{-2}$$

$$ZWD = ZWD_0 \cdot \left(1 - \frac{\beta \cdot H}{T} \right)^{\frac{(\lambda-1) \cdot g}{R_d \cdot \beta} - 1}$$

mapping function

$$m(z, p, T, \dots) = \frac{\delta S_{[\text{NEU}]}}{\delta S_{[\text{NEU}]}^{Z=0}} = \frac{\delta S_{[\text{NEU}]}}{\text{ZND}}$$

$\delta S_{[\text{NEU}]}$: neutral/total delay in slant direction
ZND: zenith neutral delay
m: mapping function
z: zenith angle from ground

Hydrostatic Mapping Functions

Saastamoinen Mapping Function

$$\delta S_{[\text{NEU}]} = \frac{0.002277 \left[\frac{\text{m}}{\text{hPa}} \right] \cdot (1 + D)}{\cos Z^*} \cdot \left(p_0 + \left(\frac{1255 [\text{K}]}{T_0} + 0.005 \right) \cdot e_0 - B \cdot \tan^2 Z^* \right) + \delta_R$$

z^* : apparent ("actual") zenith angle at the surface (antenna)

D: gravity correction

T_0 : surface (antenna) temperature in [K]

p_0 : surface (antenna) pressure [hPa]

e_0 : surface (antenna) partial pressure of water vapor [hPa]

B: height-dependent correction

d_R : elevation/height-dependent correction

$$D = 0.0026 \cdot \cos 2\varphi + 0.00028 \left[\frac{1}{\text{km}} \right] \cdot h_0$$

Chao Hydrostatic Mapping Function

$$m(\varepsilon)_{\text{[HYD]}} = \frac{1}{\sin \varepsilon + \frac{0.00143}{\tan \varepsilon + 0.00035}}$$

Black Hydrostatic Mapping Function

Davis Hydrostatic Mapping Function

Ifadis Hydrostatic Mapping Function

Herring Hydrostatic Mapping Function

Niell Hydrostatic Mapping Function

Wet Mapping Functions:

Chao Wet Mapping Function

$$m(\varepsilon)_{[\text{WET}]} = \frac{1}{\sin \varepsilon + \frac{0.00035}{\tan \varepsilon + 0.0017}}$$

Black Wet Mapping Function

Ifadis Wet Mapping Function

Herring Wet Mapping Function

Niell Wet Mapping Function

Relation between Integrated Water Vapor and Zenith Wet Delay

$$\varpi = \frac{ZWD}{IWW} = 10^{-6} \cdot R_w \cdot \left(k'_2 + \frac{k_3}{T_M} \right)$$

Relation between Precipitable Water and Zenith Wet Delay

$$PW = \frac{IWW}{\rho_{LW}}$$

weighted mean temperature of the troposphere in [K]

$$T_M = \frac{\int_{H_0}^{\infty} \frac{e}{T} \cdot Z_w^{-1} \cdot dH}{\int_{H_0}^{\infty} \frac{e}{T^2} \cdot Z_w^{-1} \cdot dH}$$

BEVIS et al. [1992 and 1994] empirically derived the linear function.

$$T_M = 70.2 \text{ [K]} + 0.72 \cdot T_0$$

MENDES et al. [2000] presented slightly different coefficients

$$T_M = 50.4 \text{ [K]} + 0.789 \cdot T_0$$

$$T_M = 54.7 \text{ [K]} + 0.77 \cdot T_0$$

SVETLOE MTR-5

$$T_M = 0.747 \cdot T_0 + 63.9 \text{ [K]}$$

$$T_M = 196.05 \text{ [K]} + 3.402 \cdot 10^{-6} \left[\frac{1}{\text{K}^2} \right] \cdot T_0^3$$