

Особенности использования сигналов системы ГЛОНАСС для дистанционного зондирования водяного пара атмосфере

Чукин В.В., Вахнин А.В., Алдошкина Е.С.

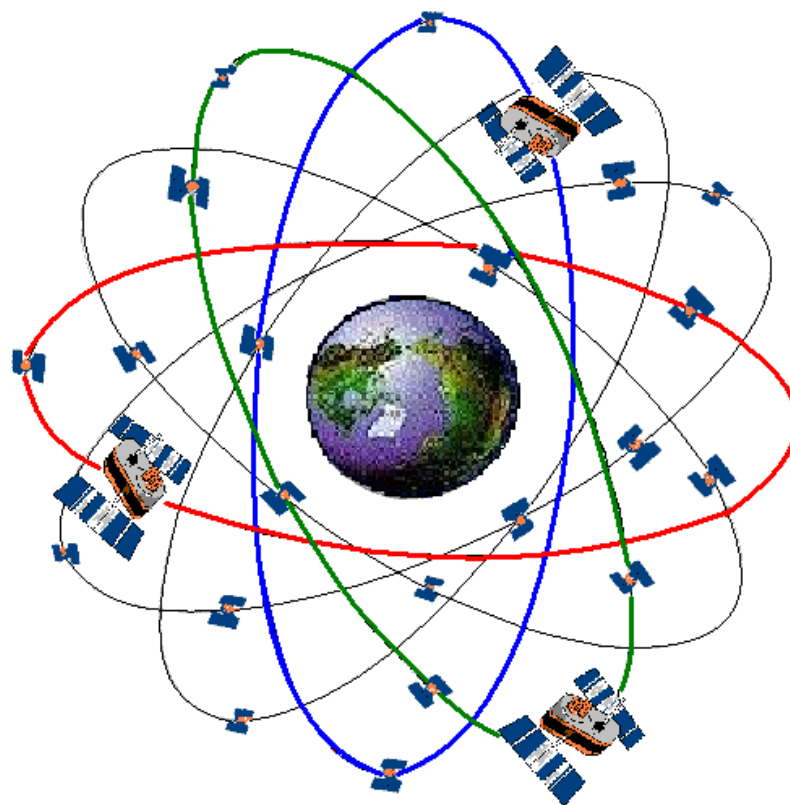


Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС)

ГЛОНАСС



GPS

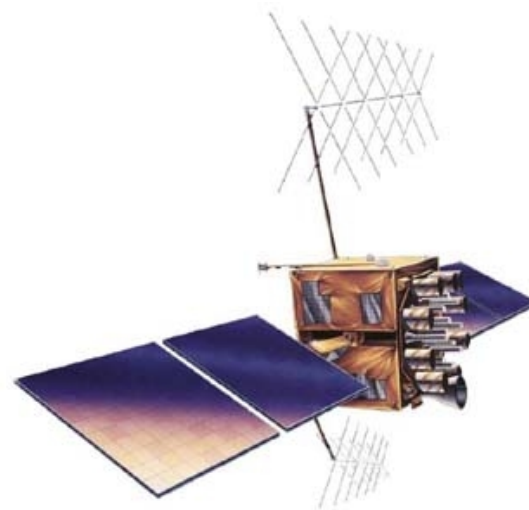


КА системы ГЛОНАСС и GPS



КА «Глонасс-М»

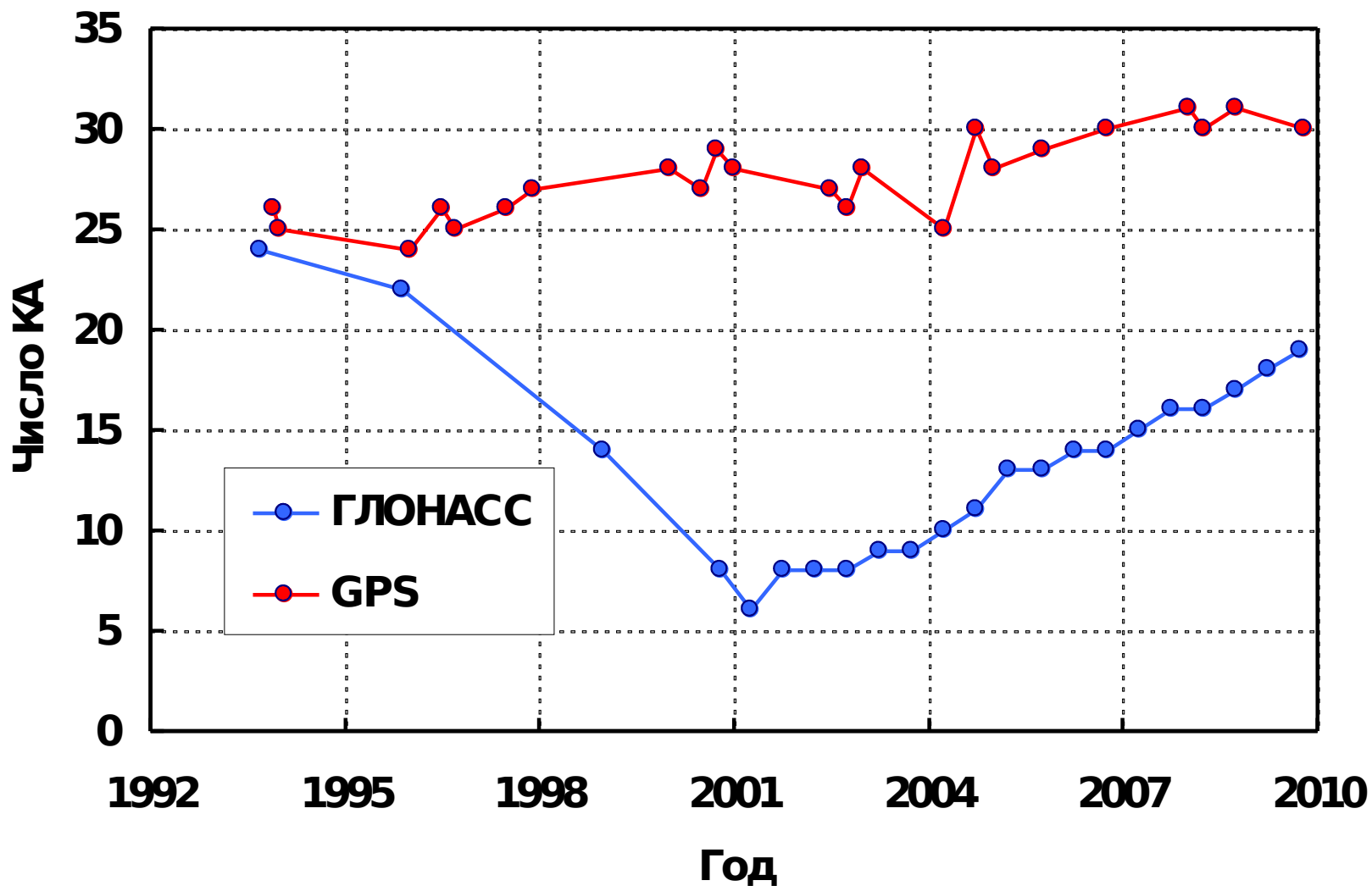
Параметр	Значение
Срок службы	7 лет
Масса	1415 кг
Мощность батарей	1400 Вт



КА «Block IIR-M»

Параметр	Значение
Срок службы	10 лет
Масса	2032 кг
Мощность батарей	1136 Вт

Орбитальная группировка КА ГЛОНАСС и GPS



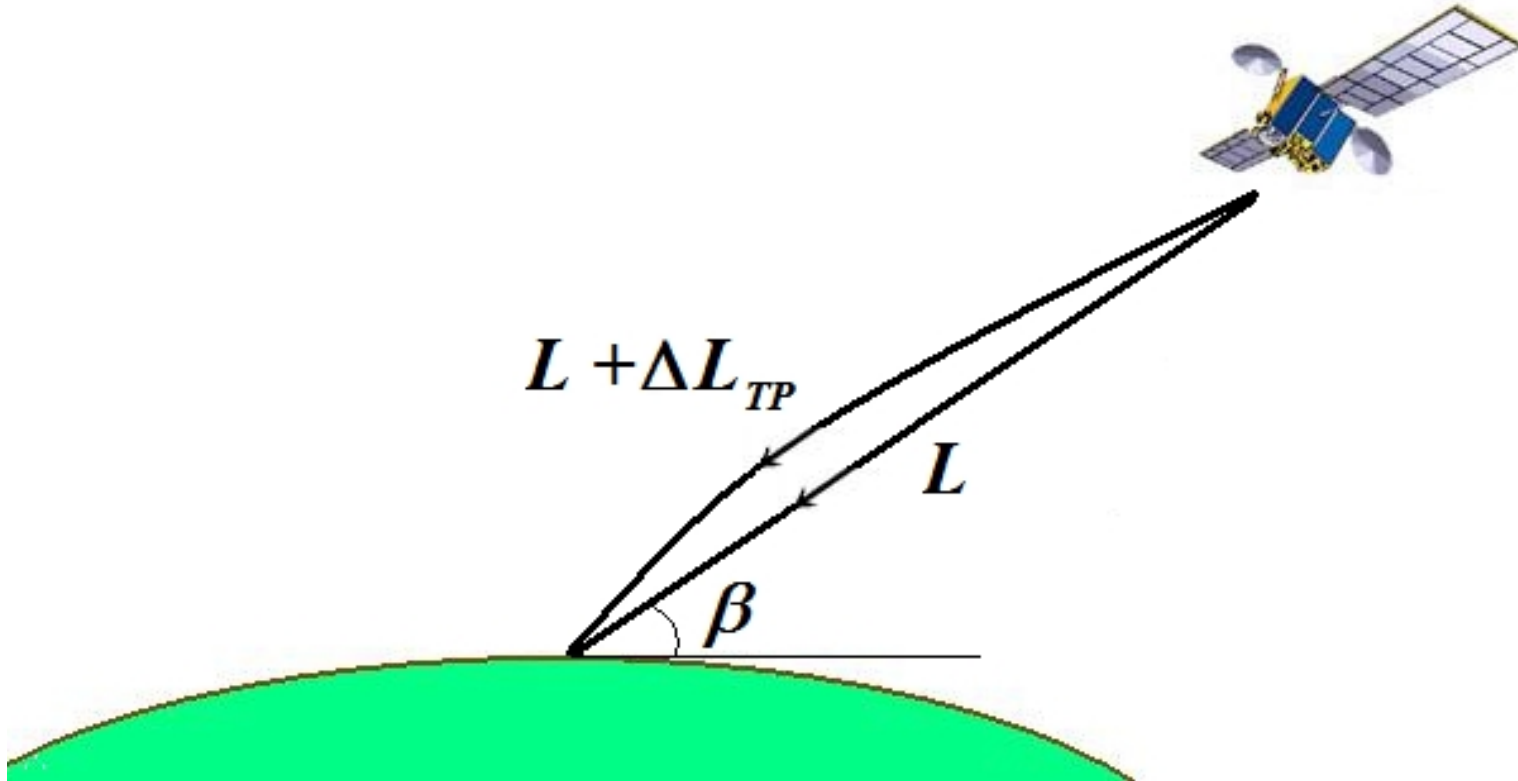
Параметры космического комплекса систем ГЛОНАСС и GPS

Параметр	ГНСС	
	ГЛОНАСС	GPS
Число спутников	19	30
Число орбитальных плоскостей	4	6
Число спутников в плоскости	8	5-6
Тип орбиты	круговая	круговая
Высота орбиты, км	19 100	20 145
Наклонение орбиты, град.	64.8	55.0
Период обращения	11 ч 16 мин	11 ч 57 мин
Частоты используемых радиосигналов, МГц	L1: 1602+k·0.5625 L2: 1246+k·0.4375	L1: 1575.42 L2: 1227.60

Типы навигационных сигналов систем ГЛОНАСС и GPS

ГНСС	Тип КА	Год	Диапазон частот			
			L1	L2	L3	L5
ГЛОНАСС	Глонасс	1982	BT, CT	BT	-	-
	Глонасс-М	2007	BT, CT	BT, CT	-	-
	Глонасс-К	2010	BT, CT, L1ROC	BT, CT	BT, CT	L5ROC
	Глонасс-КМ	2015	BT, CT, L1ROC, L1SC	BT, CT, L2OC, L2SC	BT, CT, L3SC	L5ROC
GPS	Block IIA	1990	P, C/A	P	-	-
	Block IIR	1997	P, C/A	P	-	-
	Block IIR-M	2005	P, C/A, M	P, L2C, M	-	-
	Block IIF	2009	P, C/A, M	P, L2C, M	-	I, Q
	Block III	2014	P, C/A, M, L1C	P, L2C, M	-	I, Q

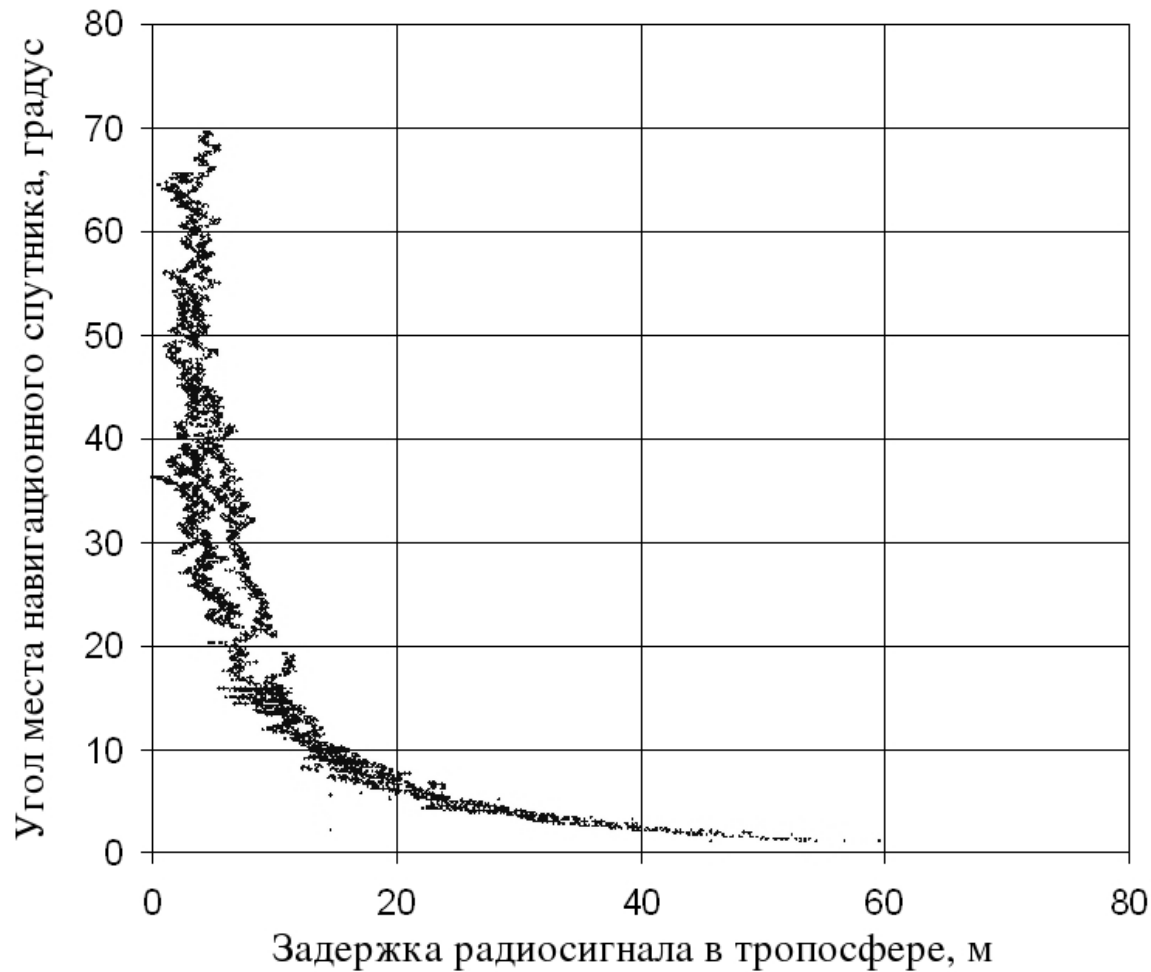
Задержка радиосигнала в тропосфере



Дополнительная задержка радиосигнала, связанная с прохождением через тропосферный слой определяется выражением:

$$\Delta L_{TP} = \int_0^L (n - 1) dl$$

Зависимость тропосферной задержки радиосигнала от высоты спутника над горизонтом



Показатель преломления тропосферы

Показатель преломления показывает во сколько раз скорость распространения радиоволн меньше скорости света и может быть представлен в виде двух слагаемых:

$$n = 1 + N_{ГС} + N_{П}$$

Гидростатическая часть показателя преломления:

$$N_{ГС} = k_1 \cdot R_C \cdot \rho$$

«Влажная» часть показателя преломления:

$$N_{П} = \left(k'_2 \cdot R_{П} + \frac{k_3 \cdot R_{П}}{T} \right) \cdot \rho_{П}$$

ρ - плотность воздуха, кг/м³

$\rho_{П}$ - плотность водяного пара, кг/м³

T - температура воздуха, К

$$k_1 = 7.760 \cdot 10^{-7} \text{ К/Па}$$

$$k_2 = 6.479 \cdot 10^{-7} \text{ К/Па}$$

$$k_3 = 3.776 \cdot 10^{-3} \text{ К}^2/\text{Па}$$

$$R_C = 287.054 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

$$R_{П} = 461.526 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

$$k'_2 = k_2 - k_1 \frac{R_C}{R_{П}}$$

Две составляющие части задержки радиосигнала в тропосфере

Подставим полученное решение в формулу для определения задержки радиосигнала в тропосфере:

$$\Delta L_{TP} = \int_0^L N_{GC} dl + \int_0^L N_{\Pi} dl$$

Отсюда видно, что задержку радиосигнала в тропосфере можно представить в виде суммы гидростатической задержки, связанной с прохождением радиосигнала сквозь тропосферу, где давление с высотой убывает в соответствии с гидростатическим законом, и задержки за счет распространения в водяном паре:

$$\Delta L_{TP} = \Delta L_{GC} + \Delta L_{\Pi}$$

Определение интегрального содержания водяного пара в атмосфере

На основе результатов измерения задержки радиосигнала во влажном воздухе возможно определение содержания водяного пара в атмосфере по расчетной формуле:

$$PWV = k \cdot \Delta L_{\Pi}$$

$$k = \left(\sin \beta + \frac{a}{\sin \beta + \frac{b}{\sin \beta + 0.05917}} \right) \cdot \left(k'_2 \cdot R_{\Pi} + \frac{k_3 \cdot R_{\Pi}}{T_m} \right)^{-1}$$

$$T_m = 70.2 + 0.72 \cdot T_0$$

$$a = 5.236 \cdot 10^{-3} + 2.471 \cdot 10^{-9} \cdot (P_0 - 10^5) + 1.724 \cdot 10^{-7} \cdot (T_0 - 288.15) + 1.328 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{e_0}$$

$$b = 1.705 \cdot 10^{-3} + 7.384 \cdot 10^{-9} \cdot (P_0 - 10^5) + 3.767 \cdot 10^{-7} \cdot (T_0 - 288.15) + 2.147 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{e_0}$$

Определение влажной части задержки радиосигнала в тропосфере

Для определения задержки радиосигнала, связанной с наличием в атмосфере молекул водяного пара, необходима информация об истинном расстоянии от приемника до передающей антенны спутника, данные измерений дальности до спутника, значение ионосферной задержки и гидростатической части задержки радиосигнала в тропосфере:

$$\Delta L_{\Pi} = L_{ИЗМ(1)} - L_{ГЕОМ} - \Delta L_{ИОН} - \Delta L_{ГС}$$

Дальность до навигационного спутника

При известном положении стационарного навигационного приемника (базовой станции) и рассчитанном положении спутника в пространстве возможно определение геометрической дальности до спутника:

$$L_{ГЕОМ} = \sqrt{(X_{СП} - X_{ПР})^2 + (Y_{СП} - Y_{ПР})^2 + (Z_{СП} - Z_{ПР})^2}$$

Задержка радиосигнала в ионосфере

При использовании двухчастотного навигационного приемника ионосферная задержка радиосигнала рассчитывается следующим образом:

$$\Delta L_{\text{ИОН}} = \frac{f_2^2 (L_{\text{ИЗМ}(2)} - L_{\text{ИЗМ}(1)})}{f_1^2 - f_2^2}$$

В случае одночастотных измерений:

$$\Delta L_{\text{ИОН}} = \frac{-40.4 \cdot \text{TEC}}{f_1^2 \left[1 - \left(\frac{R \cdot \cos(\beta)}{R + z_{\text{max}}} \right)^2 \right]^{0.5}}$$

TEC из http://sol.spacenvironment.net/~ionops/current_files/current_TEC_data.txt

$R = 6\,371\,221$ м

$z_{\text{max}} = 432\,500$ м

Гидростатическая часть задержки радиосигнала в тропосфере

Гидростатическая часть задержки может быть определена по формуле, использующей модель Саастамойнена и отображающую функцию Ифадиса:

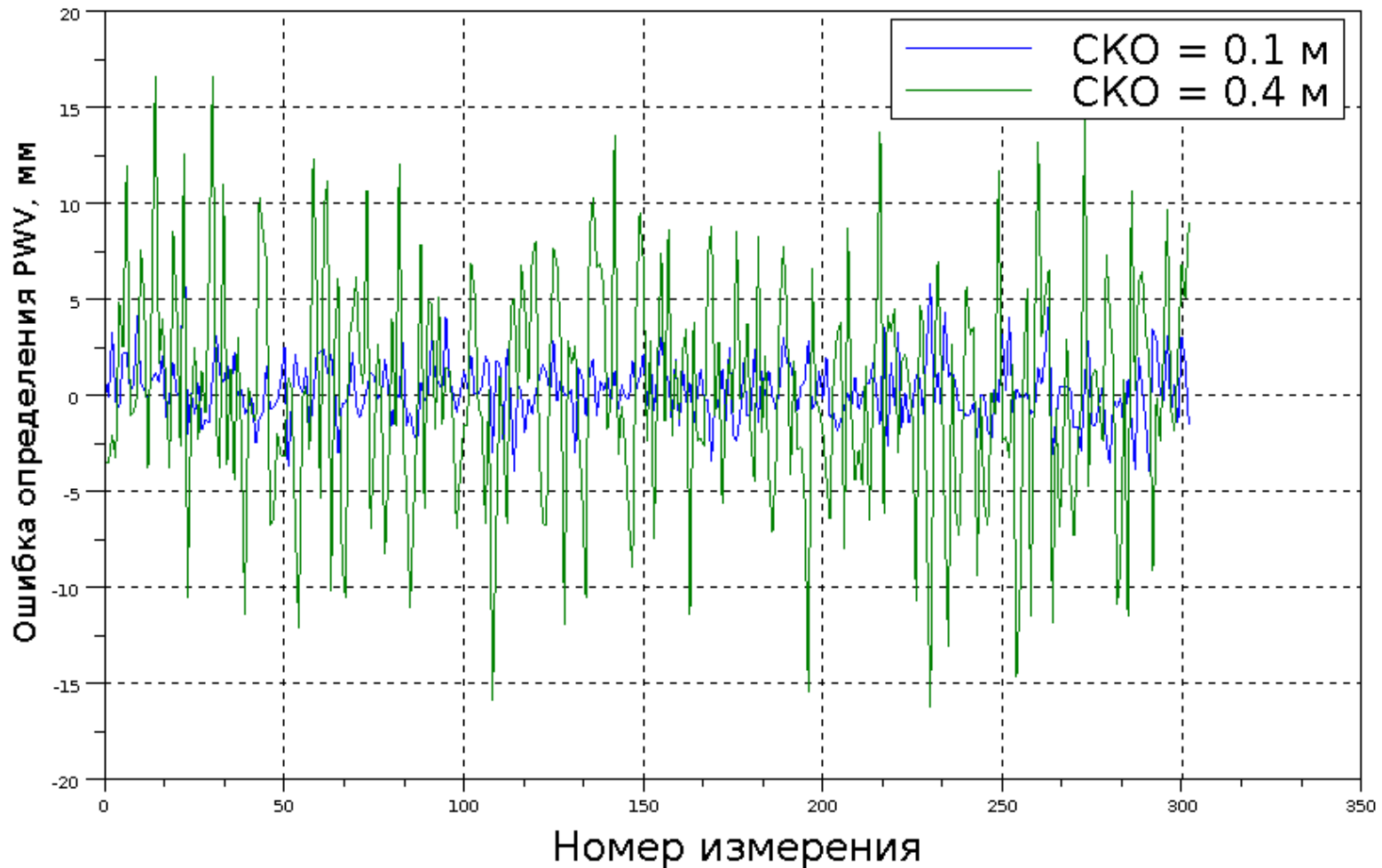
$$\Delta L_{GC} = \frac{2.2768 \cdot 10^{-5} \cdot P_0}{g_m \cdot \left(\sin \beta + \frac{a}{\sin \beta + \frac{b}{\sin \beta + 0.078}} \right)}$$

$$g_m = 9.784 \cdot [1 - 0.00266 \cdot \cos(2\varphi) - 0.00028 \cdot 10^{-3} \cdot h]$$

$$a = 1.237 \cdot 10^{-3} + 1.316 \cdot 10^{-9} \cdot (P_0 - 10^5) + 1.378 \cdot 10^{-6} \cdot (T_0 - 288.15) + 8.057 \cdot 10^{-7} \cdot \sqrt{e_0}$$

$$b = 3.333 \cdot 10^{-3} + 1.946 \cdot 10^{-9} \cdot (P_0 - 10^5) + 1.040 \cdot 10^{-7} \cdot (T_0 - 288.15) + 1.747 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{e_0}$$

Точность определения интегрального содержания водяного пара в атмосфере (Санкт-Петербург, январь-май 2009 г.)



Заключение

- Система ГЛОНАСС позволяет определять содержание водяного пара в атмосфере с приемлемой точностью;
- Получение информации о содержании водяного пара в атмосфере одновременно с помощью систем ГЛОНАСС и GPS позволит увеличить качество и оперативность метеорологического обеспечения;
- Использование оперативной информации о содержании водяного пара в атмосфере в численных моделях прогноза погоды позволит улучшить детализацию данных и точность региональных краткосрочных прогнозов погоды.

Спасибо за внимание!

Российский государственный гидрометеорологический университет
Кафедра экспериментальной физики атмосферы

канд. физ.-мат. наук, Чукин Владимир Владимирович
студент, Вахнин Антон Вячеславович,
аспирант, Алдошкина Елена Сергеевна

E-mail: chukin@rshu.ru

Сайт проекта: <http://gnss-meteo.ru>