

## О точности определения тропосферной задержки сигнала

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

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В статье дается краткий обзор методов определения тропосферной задержки радиосигнала от наблюдаемых источников. Приводится сравнение значений зенитной тропосферной задержки, полученных в ИПА РАН следующими способами: по измерениям при помощи радиометра водяного пара, в результате обработки наблюдений спутников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и обработки наблюдений методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Приводятся также результаты сравнения полученных данных с результатами Международной ГНСС-службы.

**Ключевые слова:** тропосферная задержка, ГНСС, служба ПВЗ, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, радиометр водяного пара, колокация.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.46.100-107>

### Введение

Определение тропосферной задержки, возникающей при прохождении радиосигнала от наблюдаемых источников через нейтральную атмосферу, является актуальной задачей для целей фундаментального координатно-временного обеспечения, а также точного позиционирования по сигналам ГНСС. Аналогично разделению нейтральной атмосферы на влажную и сухую компоненты принято разделять и задержку сигнала. Значение сухой компоненты задержки в зените может достигать до 2.5 м, а влажной — до 0.3 м, в зависимости от месторасположения измерительного пункта.

Компоненты тропосферной задержки не поддаются достаточно точному прогнозированию и во многих задачах должны определяться с коротким шагом и оперативно. При обработке измерений, полученных методами космической геодезии (ГНСС и РСДБ), задержки можно определить, оценивая их как неизвестные в уравнениях наблюдений. При этом результаты оценивания зависят от состава сети пунктов, количества и точности наблюдений, различных особенностей параметризации задачи и метода решения. Радиометр во-

дяного пара (РВП) на пункте наблюдения позволяет оперативно (практически в реальном времени) определять влажную компоненту тропосферной задержки по измерениям радиояркостной температуры излучения атмосферы.

В каждой из трех обсерваторий ИПА РАН постоянно проводятся ГНСС- и РСДБ-наблюдения, которые обрабатываются в Центре обработки и анализа данных при помощи оригинального программного обеспечения для определения различных параметров, в число которых входят и тропосферные задержки. Также в обсерваториях работают радиометры водяного пара, из обработки измерений которых формируются ряды значений влажной тропосферной задержки. Сравнение значений, полученных разными методами, позволяет сделать выводы о точности определяемых параметров и исследовать качество моделей, применяемых для расчета задержек.

Поскольку из обработки наблюдений можно получить лишь формальные оценки точности, которые сильно зависят от особенностей решения, и, как правило, получаются завышенными, для того, чтобы говорить о реальной точности, необходимо сравнивать между собой результаты, полученные разными методами.

## Компоненты и определение тропосферной задержки

### Компоненты тропосферной задержки

Выражение для тропосферной задержки сигнала по лучу зрения  $STD$  (*slant troposphere delay*) имеет следующий вид [1]:

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

где  $e$  — высота источника,  $a$  — азимут,  $m(e)$  — картирующие функции,  $ZTD$  — задержка в зените, индекс  $w$  (*wet*) обозначает влажную компоненту,  $d$  (*dry*) — сухую;  $g$  — градиент;  $G_N, G_E$  — значения градиентов в северном и восточном направлениях (для учета локальной асимметрии атмосферы).

При наличии метеоданных сухая компонента может быть вычислена по формуле Саастамойнена [2]:

$$ZTD_d = \frac{0.0022768 P_0}{1 - 0.00266 \cos 2\phi - 0.00000028H},$$

где  $P_0$  — атмосферное давление, а  $\phi$  — широта пункта наблюдения,  $H$  — геодезическая высота.

Точность вычисляемой задержки в зените при этом составляет не хуже 1 мм, однако при сравнении с данными, полученными из обработки, могут наблюдаться постоянные смещения.

Существуют различные картирующие функции для вычисления задержек по лучу зрения, базирующиеся на разных подходах при их построении. Некоторые модели требуют привлечения дополнительных данных для вычисления коэффициентов функций. При этом значения, получаемые по разным моделям, близки между собой; использование разных моделей мало влияет на значения зенитных задержек.

Близость значений картирующих функций для влажной и сухой компонент затрудняет совместное определение соответствующих задержек в одном решении, поскольку значения функций являются значениями частных производных и их близость приводит к плохой обусловленности матриц нормальных уравнений. Поэтому в случаях, когда сухая компонента не вычисляется по формуле, оценивается полная зенитная тропосферная задержка, а в качестве картирующей функции выбирается, как правило, функция для сухой компоненты.

#### *Радиометр водяного пара*

Радиометры водяного пара, расположенные в обсерваториях РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» измеряют яркостную температуру излучения тропосферы на двух частотах в  $K$  и  $K_a$  диапазонах [3, 4]. Для вычисления значений средней температуры тропосферы используется стандартная модель или измерения температурного профиломера МТР-5 (НПО АГТЕХ, г. Долгопрудный). В результате обработки этих данных производится оценка следующих параметров:

- влажная компонента тропосферной задержки радиосигнала;
- интегральное влагосодержание ( $\text{кг}/\text{м}^2$ );
- водосодержание ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ) на луче зрения антенны.

Сухая компонента задержки вычисляется по формуле Саастамойнена.

Отдельной проблемой в обработке данных радиометра является удаление «выбросов» — аномальных значений задержки, приходящихся на интервал выпадения осадков. Обработка «выбросов» проводится в полуавтоматическом режиме. В некоторых случаях, особенно при сильных осадках, результирующие данные имеют очень большие ошибки и не могут быть использованы.

#### *Обработка РСДБ-наблюдений*

Пакет обработки РСДБ-наблюдений *QUASAR* [5] работает в рамках Службы ПВЗ ИПА РАН [6]. С помощью этого пакета проводится глобальное уравнение всех РСДБ-наблюдений, обработка суточных и часовых серий, а также наблюдений по отдельным программам, таким как CONT (программа непрерывных (continuous) двухнедельных наблюдений). В этой работе использовались данные, полученные по коротким (часовым) сессиям на базе «Светлое» — «Зеленчукская». При обработке наблюдений часовых сессий определяются следующие параметры:

- всемирное время;
- линейный ход часов станций;
- влажная составляющая тропосферной задержки.

Сухая тропосферная задержка определяется по формуле Саастамойнена, поскольку для РСДБ-наблюдений всегда имеются метеоданные. В качестве картирующей функции в оперативном режиме используется функция NMF (Niell Mapping Function) [7].

### Обработка ГНСС-наблюдений

Обработка ГНСС-измерений проводится в рамках Службы ПВЗ ИПА РАН. В оперативном режиме обрабатываются суточные серии фазовых и кодовых измерений глобальной сети приблизительно 70 станций ГНСС с определением следующих параметров:

- орбиты спутников и параметры модели светового давления на спутники;
- вещественные фазовые неоднозначности;
- поправки часов станций и спутников;
- параметры вращения Земли (координаты полюса и длительность суток);
- полная тропосферная задержка и горизонтальные градиенты.

Тропосферная задержка оценивается без разделения на влажную и сухую компоненты. В качестве картирующей функции используется функция GMF (Global Mapping Function) [8].

На суточном интервале полная задержка параметризуется в виде полинома Чебышева 12-й степени в зависимости от эпохи  $t$ :

$$\begin{aligned}T_0(t) &= 1, \\T_1(t) &= t, \\T_{n+1}(t) &= 2tT_n(t) - T_{n-1}(t).\end{aligned}$$

Такой подход позволяет упростить процесс вычисления частных производных и определения значений поправок в рамках итерационного решения.

Горизонтальные градиенты определяются как линейные тренды на суточном интервале; в качестве картирующей функции для них используется функция Херринга [9].

### Данные тропосферной задержки IGS

Тропосферная задержка является одним из продуктов Международной ГНСС-службы (IGS) для потребителей [10]. Заявленная точность этих данных составляет 4 мм. Определение зенитной тропосферной задержки проводится в Военно-морской обсерватории США при помощи программного пакета *Bernese GPS Software Version 5.0* [11] для каждой из примерно 360 станций глобальной сети в PPP-режиме (Precise Point Positioning) с интервалом 5 мин. Определяется полная зенитная тропосферная задержка и горизонтальные градиенты; используется картирующая функция GMF. Для орбит и поправок часов используются комбинированные решения *IGS final* [12].

### Сравнение результатов

Проводилось сравнение значений влажных компонент тропосферной задержки в зените, полученных с помощью различных методик. Поскольку в ГНСС-решениях ИПА РАН и IGS определяется полная тропосферная задержка, то для сравнения с данными РВП и РСДБ влажная компонента вычисляется вычитанием из полной задержки значения сухой компоненты. В таблице приведены результаты сравнения зенитной тропосферной задержки в обсер-

ваториях «Светлое» (*Sv*), «Зеленчукская» (*Zc*) и «Бадары» (*Bd*) за 2016-й год. На рис. 1–8 приведены соответствующие графики.

На рисунках и в таблице использованы следующие обозначения:  $\Delta ZPD$  – разность зенитных тропосферных задержек,  $IAA-WVR$  – разность между данными ИПА РАН ( $IAA$ ) по ГНСС и по РВП,  $IGS-IAA$  – разность между данными службы IGS и данными ИПА РАН по ГНСС,  $IAA(VLBI)-WVR$  – разности между данными ИПА РАН по РСДБ и по РВП;  $S$  – среднееквадратическое значение разностей,  $S'$  – среднееквадратическое значение разностей за вычетом среднего значения  $M$ .

Таблица

Оценка разностей результатов определения тропосферной задержки

	$IAA-WVR$			$IGS-IAA$			$IAA(VLBI)-WVR$		
	$S'$ , мм	$M$ , мм	$S$ , мм	$S'$ , мм	$M$ , мм	$S$ , мм	$S'$ , мм	$M$ , мм	$S$ , мм
<i>Sv</i>	2.6	0.0	2.6	3.9	-2.5	4.6	—	—	—
<i>Zc</i>	11.2	-0.8	11.2	4.9	-2.7	5.6	15.5	-5.2	16.3
<i>Bd</i>	8.8	-1.5	8.9	5.3	-0.7	5.3	13.4	-3.6	14.8

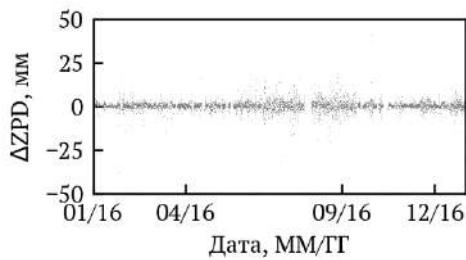


Рис. 1. Разности  $IAA-WVR$  для *Sv*

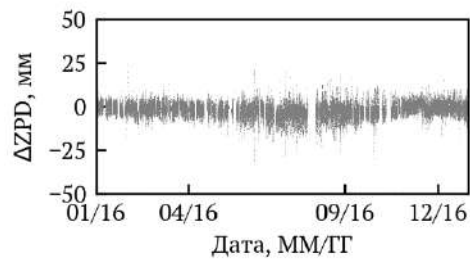


Рис. 2. Разности  $IGS-IAA$  для *Sv*

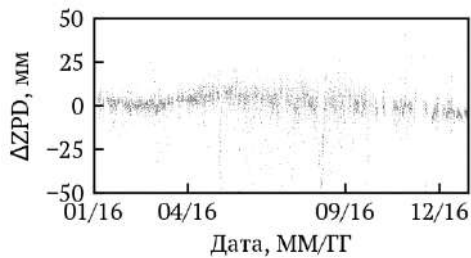


Рис. 3. Разности  $IAA-WVR$  для *Zc*

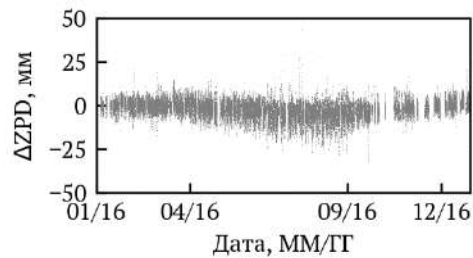


Рис. 4. Разности  $IGS-IAA$  для *Zc*

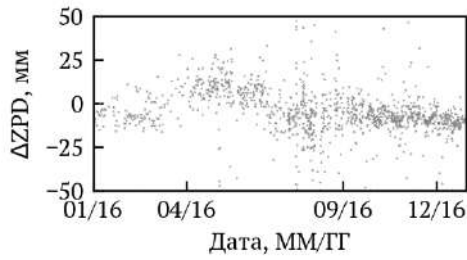


Рис. 5. Разности  $IAA(VLBI) - WVR$  для  $Zc$

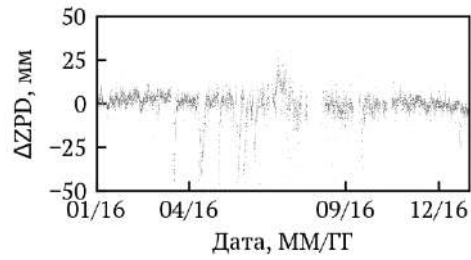


Рис. 6. Разности  $IAA - WVR$  для  $Bd$

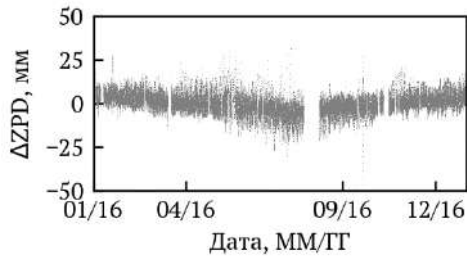


Рис. 7. Разности  $IGS - IAA$  для  $Bd$

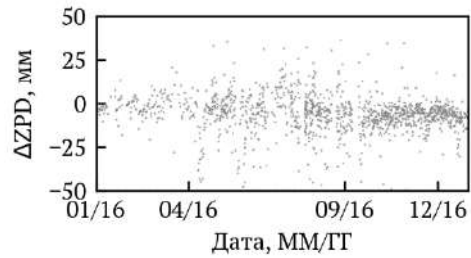


Рис. 8. Разности  $IAA(VLBI) - WVR$  для  $Bd$

Из приведенных сравнений видно, что разности между результатами для разных станций и техник существенно различаются. Наиболее близкими по всем станциям являются ряды данных, полученных из обработки ГНСС-наблюдений в ИПА РАН и IGS соответственно. Однако для всех станций кроме систематического сдвига в рядах разностей наблюдается «прогиб» в летние месяцы, что явно свидетельствует о несогласованности моделей, используемых при обработке. При этом необходимо учитывать, что в сравнении с независимой техникой РВП такой прогиб не наблюдается.

Наилучшее согласие имеет место между данными ИПА РАН из ГНСС и РВП для обсерватории «Светлое». Для обсерваторий «Зеленчукская» и «Бадары» разброс значений существенно больше, а кроме того, отчетливо видны довольно сильные выбросы. Это связано с недостаточно хорошо отлаженной системой фильтрации измерений РВП. Кроме того, результаты РВП чувствительны к параметрам принятой модели первичной обработки данных. Эти параметры будут последовательно уточняться по мере накопления экспериментальных данных.

Большой разброс в разностях с данными РСДБ объясняется, главным образом, длительностью сессий (1 час): в таком режиме не достигаются максимальные точности определения параметров.

## Заключение

Проведенный анализ показывает, что результаты определения тропосферной задержки по всем техникам в целом удовлетворяют требованиям в задачах космической геодезии и точного позиционирования. Однако при этом есть систематические разности, а также сезонные смещения между данными как по разным техникам, так и по ГНСС-технике между результатами ИПА РАН и IGS.

В дальнейшем наряду с продолжением накопления измерений предполагается решать следующие задачи:

- совершенствование методик калибровки РВП, уточнение параметров модели первичной обработки данных и технологии удаления «выбросов»;
- анализ существующих систематических разностей;
- анализ влияния на результаты используемых картирующих функций;
- тестирование отдельного определения влажной и сухой компонент задержки для ГНСС-обработки;
- добавление новых пунктов и других центров обработки для анализа данных.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО» и ЦКП «Суперкомпьютерный центр «Высокопроизводительные вычисления в радиоастрометрии и космической геодезии».

## Литература

1. *Petit G., Luzum B.* IERS Conventions 2010 (IERS Technical Note 36). — Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. — P. 135.
2. *Saastamoinen J.* Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites // *The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophysical Monograph Series / ed. by Henriksen S. W., Mancini A., Chovitz B. H.* — 1972. — Vol. 15. — P. 247–251.
3. *Ильин Г. Н., Быков В. Ю., Стэмповский В. Г., Шишкин А. М., Ипатов А. В., Миллер Е. А.* Аппаратные средства мониторинга параметров атмосферы в обсерваториях РСДБ-комплекса Квазар-КВО // *Труды ИПА РАН.* — СПб.: ИПА РАН, 2015. — Вып. 33. — С. 52–57.
4. *Ильин Г. Н., Троицкий А. В.* Определение тропосферной задержки радиосигнала радиометрическим методом // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика* — Н. Н.: ННГУ, 2017. — Т. 60. № 4. — С. 326–335.
5. *Губанов В. С., Курдубов С. Л., Суркис И. Ф.* Новая версия пакета QUASAR для обработки РСДБ-наблюдений // *Труды ИПА РАН.* — СПб.: ИПА РАН, 2017. — Вып. 16. — С. 61–83.
6. *Гаязов И. С., Губанов В. С., Курдубов С. Л., Скурихина Е. А., Суворкин В. В., Шарков В. С., Братцева О. А., Рец Я. П.* Служба параметров вращения Земли ИПА РАН // *Труды ИПА РАН.* — СПб.: ИПА РАН, 2016. — Вып. 39. — С. 23–29.
7. *Niell A. E.* Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths // *J. Geophys. Res.* — 1996. — Vol. 101. — P. 3227.

8. *Boehm J., Niell A., Tregoning P., Schuh H.* Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data // *Geophysical Research Letters*. — 2006. — Vol. 33. — L01603.

9. *Herring T. A.* Modelling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data, in *Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy* // *Netherlands Geod. Commis* / ed. by J. C. de Munck, T. A. Th. Spoelstra. — Ned. Comm. voor Geod, Delft, 1992. — Ser. 36. — P. 157–164.

10. IGS Products [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.igs.org/products> (дата обращения: 18.05.2018).

11. *Dach R., Hugentobler U., Fridez P. and Meindl M.* Bernese GPS software version 5.0. — Astronomical Institute, University of Bern, Bern. — 2007.

12. *Byram S., Hackman C.* IGS Final Troposphere Product Update. [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.igs.org/assets/pdf/Workshop%202014%20-%20PS05> — Byram — 2235 — IGS Final Troposphere Product Update.pdf.

## Accuracy in Estimation of Tropospheric Delays

V. V. Suvorkin, G. N. Ilin, S. L. Kurdubov, I. S. Gayazov, V. Yu. Bykov

This paper gives a short review of the methods to estimate tropospheric delays of radio signals. It compares delays obtained in the IAA RAS from the processing the data received from the water vapor radiometer (WVR), the Global Navigation Satellite Systems (GNSS), and the Very Long Baseline Interferometry (VLBI). Also, the data obtained by the IAA RAS Analysis Center are compared with the data from the International GNSS Service.

**Keywords:** tropospheric delay, GNSS, Earth Orientation Parameters (EOP), VLBI, water vapor radiometer (WVR), colocation.