

## **Сравнение моделей для расчёта тропосферной задержки навигационных сигналов системы ГЛОНАСС**

**© Р. В. Агапов, С. М. Широкий, Е. В. Титов**

АО «НПК «СПП», филиал «ПНБО», г. Королев, Московская обл., Россия

Одним из значимых факторов, влияющих на точность навигационных определений потребителей системы ГЛОНАСС, является погрешность, вносимая тропосферой вдоль пути распространения навигационных сигналов. Представлены оценки точности различных глобальных моделей тропосферной задержки (UNB3m, GPT2w, ESA-Site и ГАМТЗ) по сравнению с данными абсолютных радиометров водяного пара (РВП), эксплуатируемых в узлах колокации радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО». Полученные результаты позволяют рекомендовать использовать модель ГАМТЗ при коррекции эффекта тропосферной рефракции для широкого круга потребителей системы ГЛОНАСС.

**Ключевые слова:** тропосферная задержка, ГЛОНАСС, радиометр водяного пара, UNB3m, GPT2w, ESA-Site, ГАМТЗ.

### **Введение**

Обеспечение точности ГЛОНАСС является современным вызовом авиационно-космической отрасли. Одним из значимых факторов, влияющих на точность навигационных определений, является погрешность, вносимая тропосферой вдоль пути распространения навигационного сигнала. Навигационное обеспечение потребителей системы ГЛОНАСС с прецизионной точностью невозможно без учета данного фактора [1].

В современной практике используются различные глобальные модели для расчёта тропосферной задержки (ТЗ), основанные на прогнозируемых значениях метеопараметров в точке наблюдения и известных соотношениях их связи с величиной тропосферной задержки. В основном модели содержат в себе всю необходимую информацию

для восстановления тропосферной задержки, а их точность определяется соответствием наблюдаемых метеопараметров тем, что заложены в модель цифровой погодной карты. К таким моделям относятся, например, UNB3m [3] и GPT2w [4]. Некоторые математические модели являются корректируемыми и предусматривают возможность использования коррекций, передаваемых по информационным каналам поставщиками метеоданных с целью актуализации информации модели о текущей метеообстановке. К таким моделям, например, относятся ESA-Site [5] и ГАМТЗ [6].

Для исследования точности известных моделей [3-6] использованы оценки тропосферной задержки по данным РВП из состава узлов колокации радиointерферометрического комплекса «Квазар-КВО», которые характеризуются независимостью, в силу специфики свойств измерений, и достаточной точностью [2]. Радиометрический метод определения «влажной» компоненты задержки, как известно, основан на измерениях вариаций яркостной температуры излучения атмосферы в окрестностях линии излучения водяного пара, зависящей от величины поглощения сигнала в ней. Основной вклад в изменение коэффициента поглощения сигнала в атмосфере вносят нижние слои тропосферы (до 5–6 км), где содержится большая часть газообразного и конденсированного водяного пара, которые отвечают за вариации задержки.

### **Модели ТЗ**

Текущая концепция ГЛОНАСС подразумевает ответственность потребителя навигационного сигнала за коррекцию вклада тропосферы в точность измерений радионавигационных параметров. При этом в интерфейсном контрольном документе (ИКД) на систему ГЛОНАСС [7] не содержатся алгоритмы расчета ТЗ навигационных сигналов и рекомендаций по учету эффекта тропосферной рефракции при решении навигационной задачи у потребителя. В ИКД на систему GPS [8] необходимость учета параметра, корректирующего эффект тропосферной рефракции, при обработке навигационных измерений обозначена явным образом. Однако необходимые аналитические соотношения также не приводятся, что может быть обусловлено соблюдением патентной чистоты и делегированием права выбора тропосферной модели по выбранному критерию (точности, оперативности, ресурсоемкости и др.) непосредственно разработчику потребительской аппаратуры. Известные глобальные модели ТЗ представляют собой погодные карты,

модели для зенитных составляющих тропосферной задержки и функции ее отображения.

Примером «компактной» модели служит модель UNB3m [3]. Эта модель, разработанная в Университете Нового Брунсвика, построена на соотношениях Девиса [9] для зенитных составляющих тропосферной задержки, функции Ниела [10] для отображения и стандартной атмосферы США в качестве источника метеопараметров. Погодная карта представляет собой 50 коэффициентов широтного разложения 6 метеопараметров. Такой объём используемых данных позволяет производить расчёт при небольших вычислительных ресурсах.

Распространённая модель GPT2w [4] базируется на обработанной погодной карте ERA-Interim, соотношениях Саастамойнена [11] для гидростатической составляющей зенитной ТЗ, Аскне и Норидуса [12] для «влажной» составляющей зенитной ТЗ и функции отображения Венского технологического университета [13]. Погодная карта представляет собой структурную географическую сетку с шагом в  $1^\circ$ , содержащую 2712600 коэффициентов разложения 10-ти метеопараметров. Использование такой погодной карты с учетом 5 коэффициентов разложения для каждого узла сетки требует большого числа вычислений.

Примером корректируемой модели тропосферной задержки является модель ESA-Site [5]. Она является модификацией «чистой» модели Европейского космического агентства путём введения в используемую погодную карту актуальной метеосводки Европейского погодного центра. Для погодной сетки в  $1^\circ$  объём корректируемой информации составляет 194400 коэффициентов. В качестве канала доставки корректируемой информации предлагается использовать широкополосный доступ.

Глобальная адаптивная модель тропосферной задержки (ГАМТЗ), дополняющая модель GPT2, рассматривается в качестве перспективной модели [6]. Она предусматривает передачу потребителям в составе перспективных навигационных сигналов ГЛОНАСС поправок в виде коэффициентов ряда разложения (до 56) по сферическим функциям. Небольшая погодная карта, содержащаяся в модели GPT2, и малый объём коэффициентов разложения позволяет осуществлять расчет тропосферной задержки у потребителя с требуемой точностью в условиях ограниченной вычислительной мощности.

### РСДБ-комплекс «Квазар-КВО»

РСДБ-комплекс «Квазар-КВО» включает в себя 3 узла колокации, расположенные в обсерваториях «Зеленчукская», «Светлое» и «Бадары» на территории Карачаево-Черкесской республики, в Ленинградской области и республики Бурятия соответственно. В состав средств узлов колокации входят РВП. Соотношения [2] обеспечивают миллиметровый уровень точности восстановления величины тропосферной задержки по измерениям яркостной температуры. Поскольку точность рассматриваемых моделей UNB3m, GPT2w, ESA-Site и ГАМТЗ существенно ниже, данные радиометра могут быть использованы в качестве эталонных при взаимном сравнении точности моделей.

### Результаты сравнения с использованием данных РВП

Для сравнения точности моделей осуществлялся расчет изохронных модельных значений ТЗ и их сравнение с эталонными значениями на основе измерений РВП. Единичные оценки точности обрабатывались на основе методов математической статистики с расчетом искомых показателей точности моделей. Графики невязок наблюдений РВП, установленных на узлах колокации «Квазар-КВО» и рассматриваемых моделей представлены на рис. 1–3.

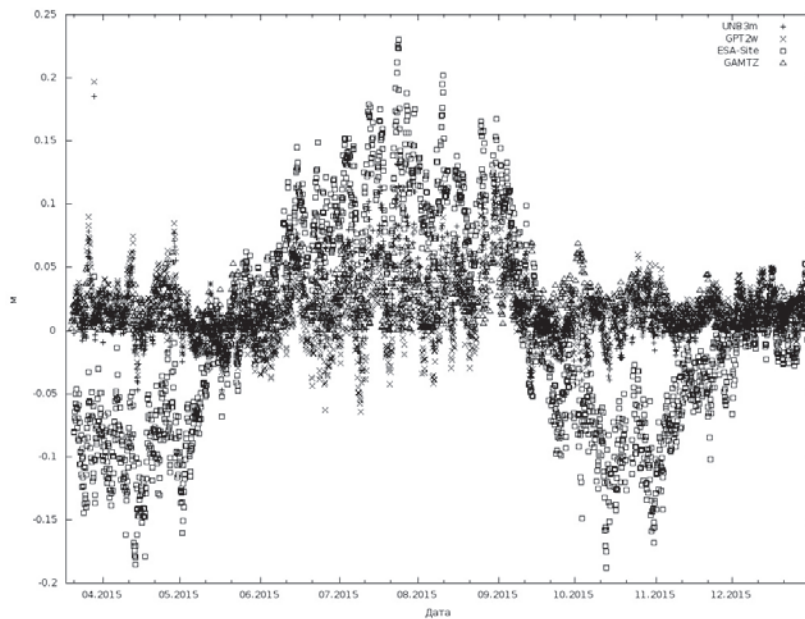


Рис. 1. Разности ТЗ, вычисленных по модели и по наблюдениям РВП узла колокации «Бадары»

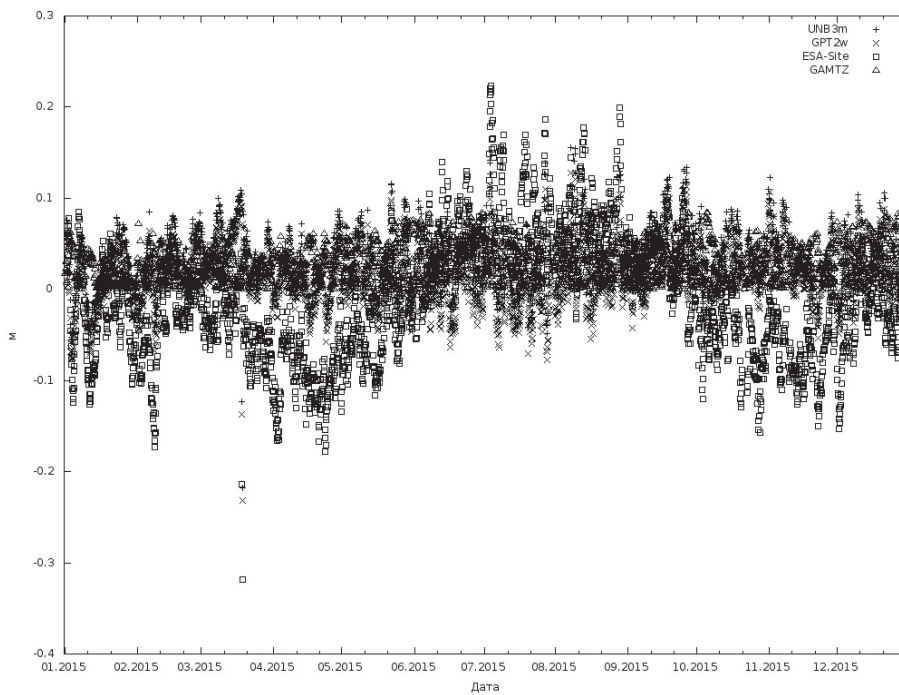


Рис. 2. Разности ТЗ, вычисленных по модели и по наблюдениям РВП узла колокации «Светлое»

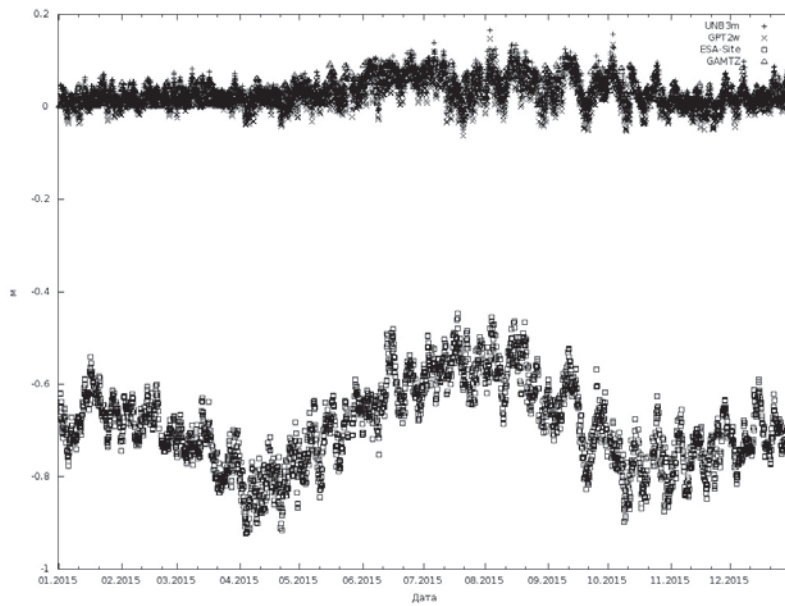


Рис. 3. Разности ТЗ, вычисленных по модели и по наблюдениям РВП узла колокации «Зеленчукская»

Таблица

## Показатели точности

Модель	Бадары		Светлое		Зеленчукская	
	СКО, см	СКП, см	СКО, см	СКП, см	СКО, см	СКП, см
UNB3m	3.00	3.34	3.00	4.60	3.00	4.96
GPT2w	2.47	2.84	3.26	3.52	3.01	3.63
ESA-Site	8.34	12.44	6.65	6.68	9.02	68.19
ГАМТЗ	1.57	2.48	1.98	3.45	2.52	4.05

Статистические показатели точности моделей представлены в таблице.

### Заключение

Рассмотрены модели UNB3m, GPT2w, ESA-Site и ГАМТЗ учёта тропосферной задержки, отличающиеся используемыми математическими соотношениями, объёмом и источниками исходных данных (цифровой погодной карты), а также возможностью коррекции модели. Оценена точность моделей по данным РВП из состава узлов колокации комплекса «Квазар-КВО».

Модель UNB3m показывает удовлетворительную точность и может быть рекомендована для мобильных потребителей, не имеющих возможности корректировать модель (с ограниченными вычислительными ресурсами).

Модель GPT2w показывает хорошую точность, и её стоит рекомендовать потребителям, у которых отсутствует возможность получения параметров коррекции и есть вычислительные мощности для обработки большого количества коэффициентов погодной карты.

Модель ESA-Site обеспечивает наихудшую точность, что объясняется отсутствием законченной методики введения данных коррекции в исходную модель.

Модель ГАМТЗ обеспечивает потребителей коррекциями тропосферной задержки в реальном масштабе времени, в абсолютном режиме навигации, с точностью, близкой к точности GPT2w при использовании меньшего количества коэффициентов.

## Литература

1. Пасынков В. В. и др. Решение проблемы точности системы ГЛОНАСС и перспективы ее улучшения в ближайшие годы // Труды ИПА РАН. — Вып. 35. — СПб.: ИПА РАН, 2015. — С. 17–23.
2. Тумов Е. В. и др. Экспериментальные оценки точности учёта тропосферной задержки навигационных сигналов ГЛОНАСС по данным абсолютного РВП // Труды ИПА РАН. — Вып. 36. — СПб.: ИПА РАН, 2016. — С. 90–96.
3. Leandro R., Santos M., Langley R. UNB Neural Atmosphere Models // Development and Performance. Proceedings of ION NTM. — Monterey, California, USA, 2006. — P. 564–573.
4. Bohm J., et al. Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere // GPS Solution. — Vol. 19. — Springer Berlin Heidelberg, 2015. — P. 433–441.
5. Lei Yang, et al. Numerical Weather Prediction Based Troposphere Correction for Real Time Precise Point Positioning // ES1206-GNSS4WEC COST Workshop, Iceland. — 2016.
6. Широкий С. М., Тумов Е. В. О способе повышения точности навигации потребителей ГЛОНАСС с использованием адаптивной модели тропосферы, передаваемой в навигационном сообщении // Труды ИПА РАН. — Вып. 27. — СПб.: Наука, 2013. — С. 326–333.
7. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ (редакция 5.1). — 2008.
8. Navstar GPS Space Segment // Navigation User Interfaces. ICD-GPS-200. — 2003.
9. Davis J. et al. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length // Radio Sci., 20(6). — USA, 1985. — P. 93–1607.
10. Niell A. Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths // Journal of Geophysical Research. — Vol. 101, No. B2. — USA, 1996. — P. 3227–3246.
11. Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites // The Use of Artificial Satellites for Geodesy Vol. 15 edited by Henriksen S. W. et al. — Washington, D.C., USA, 1972. — P. 247–251.
12. Askne J., Noridus H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data // Radio Science/ — Vol. 22, No. 3. — USA, 1987. — P. 379–386.
13. Bohm J. et al. Troposphere mapping functions for GPS and Very Long Baseline Interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data // J. Geophys. Res. 111. — 2006.



## **Comparison of the Models to Estimate a Tropospheric Delay of the GLONASS Navigation Signals**

**R. V. Agapov, S. M. Shirokiy, E. V. Titov**

The article presents the results of estimating the accuracy of global models of the tropospheric delay in comparison with the data of a water vapor radiometer (WVR). Such models as UNB3m, GPT2w, ESA-Site and GAMTZ are considered.

The tropospheric delay has been calculated from the measurements of the WVRs which are located in the Svetloe, Zelenchukskaya and Badary observatories of the radio interferometric network “Quasar”, and compared with the estimations made from the models.

The results obtained make it possible to recommend the GAMTZ model to a wide range of GLONASS users correcting the delay effect of the navigation signal by the effect of tropospheric refraction.

**Keywords:** tropospheric delay, GLONASS, WVR, UNB3m, GPT2w, ESA-Site, GAMTZ.