

**Анализ точности оценки зенитных тропосферных задержек,
полученных с помощью метода высокоточного абсолютного
местопределения**

Валайтите А.А.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, 125993, Россия

e-mail: alinavalaytite@gmail.com

Статья поступила 14.01.2020

Аннотация

В работе представлен сравнительный анализ точности оценки зенитных тропосферных задержек, полученных в результате постобработки навигационных измерений методом высокоточного абсолютного местопределения (англ. Precise Point Positioning - PPP). Расчет тропосферных задержек производился с помощью программного обеспечения gLAB и онлайн-сервисов CSRS-PPP и MagicGNSS. Оцененные таким образом тропосферные задержки, сравнивались с опорными тропосферными задержками в формате “*.zpd”, предоставленными международной службой IGS (англ. «The International GNSS Service»). В качестве показателя точности полученных оценок зенитных тропосферных задержек в работе был применен средний квадрат ошибки (RMS). Сделаны выводы о целесообразности использования данных программных продуктов с целью высокоточной оценки зенитной тропосферной задержки.

Ключевые слова: глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), метод высокоточного абсолютного местоопределения, зенитная тропосферная задержка, программа CSRS-PPP, программа gLAB, программа magicGNSS

Введение

В настоящее время увеличивается количество областей применения приемников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), помимо задач требующих высокую точность определения позиции таких как: геодезия, мореплавание, автономное управление техникой, навигационные данные используются для оценки параметров атмосферы[1].

Применение навигационного приемника для зондирования атмосферы дает возможность определить такие физические параметры как: интегральное содержание водяного пара, давление, высота тропопаузы, которые в свою очередь необходимы для мониторинга погоды и изменения климата[2,3]. Другим примером использования ГНСС приемника, кроме задач связанных с определением местоположения потребителя, является интеграция задержки тракта, полученной из навигационного приемника, с измерениями микроволнового радиометра, с целью высокоточной оценки влажной составляющей тропосферной задержки для альтиметрических продуктов [4,5].

Одним из наиболее перспективных методов вторичной обработки навигационных сигналов, позволяющих оценить величину зенитной тропосферной задержки, является метод высокоточного абсолютного местоопределения.

В силу возрастания всемирного интереса к данному методу местоопределения, связанного в основном с возможностью его применения в различных областях, существует множество готовых алгоритмов его реализий, в том числе в качестве онлайн-сервисов и прикладных программ[6,7].

Данная статья дает сравнительный анализ точности оценок зенитных тропосферных задержек, полученных при обработке навигационных измерений от четырех наземных станций международной сети IGS в трех программных продуктах: gLAB, CSRS-PPP и MagicGNSS.

Тропосферная задержка

На распространение навигационного сигнала в слоях атмосферы влияет содержание электронов в ионосфере и плотность воздуха в электрически нейтральной атмосфере - тропосфере. Влияние тропосферы описывается общей преломляющей способностью N :

$$N=10^6(n-1) \quad (1)$$

Общая преломляющая способность тропосферы может быть разделена на две основных составляющих: гидростатическую N_{dry} и влажную N_{wet} , которые зависят от таких метрологических параметров как давление, температура и парциальное давление водяного пара [8].

$$N = N_{dry} + N_{wet} = k_1 \cdot \frac{p-e}{T} + k_2 \cdot \frac{e}{T} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \quad (2)$$

где $k_1 = 7,76 \cdot 10^{-7}$ [К/Па]; К/Па; $k_2=7,04 \cdot 10^{-7}$ [К/Па]; $k_3= 3,739 \cdot 10^{-3}$ [К²/Па];

P – атмосферное давление, [Па]; T – температура воздуха, [К]; e – парциальное давление водяного пара, [Па].

Задержка радиосигнала, связанная с прохождением через тропосферный слой, может быть определена по формуле:

$$\Delta^{ptr} = 10^{-6} \cdot \int_r^{ws} N dl \quad (3)$$

где Δ^{ptr} – пространственная задержка радиосигнала в тропосфере, [м]; N – показатель преломления радиоволн; l – расстояние, проходимое радиосигналом от приемника r , до спутника ws , [м];

Тропосферная задержка также может быть разделена на гидростатическую и влажную компоненты. Следовательно, уравнение (2) можно записать в виде:

$$\Delta^{ptr} = 10^{-6} \cdot \int_r^{ws} N_{dry} dl + 10^{-6} \cdot \int_r^{ws} N_{wet} dl \quad (4)$$

Общая тропосферная задержка к траектории спутник-приемник может быть отображена в зенитном направлении, что дает зенитную тропосферную задержку Z_{TD} . Преобразование «наклонной» составляющей тропосферной задержки происходит при помощи использования функции отображения mf (анг. Mapping function), производящей пересчет в зависимости от угла места спутника[9]. Зенитную тропосферную задержку можно также представить как сложение зенитной гидростатической задержки (Z_{DRY}) и зенитной влажной задержки (Z_{WET}):

$$Z_{TD} = Z_{DRY} + Z_{WET} \quad (5)$$

$$\Delta^{pr} = Z_{DRY} \cdot mf_{dry}(E) + Z_{WET} \cdot mf_{wet}(E) \quad (6)$$

где $mf_{dry}(E)$ и $mf_{wet}(E)$ – функции отображения для гидростатической и влажной составляющих зенитной тропосферной задержки.

Зенитная тропосферная задержка (Z_{TD}) может быть определена как интеграл от преломляющей способности N в зенитном направлении:

$$Z_{TD} = 10^{-6} \cdot \int_{h_r}^{\infty} N \, dl = 10^{-6} \cdot \int_{h_r}^{\infty} N_{DRY} \, dl + 10^{-6} \cdot \int_{h_r}^{\infty} N_{WET} \, dl \quad (7)$$

Метод высокоточного абсолютного местоопределения

Данный режим работы навигационного приемника - это режим обработки кодовых и фазовых измерений в приемнике потребителя, позволяющий получать высокоточные результаты местоопределения при использовании только одного приёмника и высокоточной эфемеридно-временной информации (ЭВИ), которая содержит уточненные сведения об орбитах и смещениях спутниковых часов. Эту информацию в реальном времени формируют и передают различные коммерческие сервисы, а также для некоммерческого использования - некоторые исследовательские университеты и службы (IGS, DLR, CNES, NRCAN и др.) Точность местоопределения при этом зависит, в том числе, от качества и темпа передачи, используемой в обработке ЭВИ[10,11].

Основное преимущество режима высокоточного абсолютного местоопределения PPP над фазовым дифференциальным режимом

позиционирования (англ. Real Time Kinematic -RTK) - это глобальность покрытия и независимость от наличия вблизи потребителя базовых станций. Для функционирования режима PPP, потребителю не нужен второй приемник, привязанный к точке с точно известными координатами, либо сетевой RTK, за который также надо дополнительно платить и который не функционирует глобально.

Таблица 1 – Используемое программное обеспечение

	CSRS-PPP	gLAB	magicGNSS
Версия ПО	–	5.4.4	–
Режим работы	Статика/кинематика	Статика/кинематика	Статика/кинематика
Система координат	ITRF2008	ITRF2008	ITRF2008
Тип ЭВИ	IGS final	IGS final	IGS final
Используемая модель тропосферной задержки	GPT2w	UNB3m	GPT2w
Проецирующая функция	VMF1	NMF	VMF1
Тип измерений	Кодовые и фазовые	Кодовые и фазовые	Кодовые и фазовые
Частотный режим	Двухчастотный (L1,L2)	Двухчастотный (L1,L2)	Двухчастотный (L1,L2)
Коррекция смещения фазового центра	–	С файла ANTEX	–
Обработка вперед-назад	–	Применяется	–

В настоящий момент существует множество реализаций метода высокоточного абсолютного местоопределения, каждая реализация может иметь различные представления математической модели наблюдений, разную запись уравнений фильтра Калмана, и использовать эфемеридно-временную информацию из различных источников. В данной статье было выбрано три реализации метода высокоточного абсолютного местоопределения: два в виде онлайн-сервисов CSRS-PPP и MagicGNSS и один в виде программного обеспечения gLAB. Краткое описание используемых программных продуктов представлено в таблице 1.

Методика экспериментального исследования

Методика экспериментального исследования позволяет обосновать действия по проведению эксперимента и выполнить его, следуя конкретным этапам:

- Учитывая тот факт, что наибольший вклад в ошибку определения тропосферной задержки вносит неточность оценки ее влажной составляющей, навигационные измерения подбирались таким образом, чтобы метеорологические условия на выбранных станциях резко отличались друг от друга. В связи с этим в качестве навигационных измерений использовались измерения наземных станций: SCIP00USA, PIE100USA, INEG00MEX и DHLG00USA, предоставляемые международной службой IGS (англ. «The International GNSS Service») [12]. Днями, выбранными для проведения исследования, были 9-е января и 17 июля 2019 года, поскольку эти даты охватывают самые засушливые и самые дождливые дни в течение года.

Параметры температуры и влажности по каждой из станций представлены в таблице 2.

Таблица 2 –Метеорологические данные по каждой из станций

	SCIP00USA, Оклахома, США		PIE100USA Нью-Мексико, США		INEG00MEX Мехико, Мексика		DHLG00USA, Дурмид Хилл, США	
	январь	июль	январь	июль	январь	июль	январь	июль
Среднесуточная температура	+5°C	+33°C	+7°C	+27°C	+10°C	+19°C	+13°C	+31°C
Относительная влажность	61%	48%	47%	70%	45%	79%	27%	18%

- Исходя из теории математической статистики, которая говорит о том, что при большом объеме выборки (более 100 независимых отсчетов), величина ее среднеквадратического отклонения должна быть довольно близка к среднеквадратическому отклонению генеральной совокупности («к истинному значению»), длительность каждого эксперимента в работе составляла более 16 часов (>59000 эпох);
- Для оценки точности зенитных тропосферных задержек, полученных разными сервисами в режиме высокоточного абсолютного местоопределения, за опорное значение были взяты тропосферные задержки в формате «*.zpd»,

рассчитанные международной службой IGS в течение 4 недель. По данным IGS точность их тропосферного продукта составляет менее 4 мм [13].

- Оценка точности зенитной тропосферной задержки проводилась с учетом среднего квадрата ошибки (RMS), который рассчитывался по формуле:

$$\text{RMS} = \sqrt{\text{СКО}^2 + \text{M}^2},$$

где СКО – среднеквадратическое отклонение; М – математическое ожидание.

Экспериментальное исследование

Для того, чтобы получить оценку зенитных тропосферных задержек навигационные измерения с 4 наземных станций вместе с высокоточной ЭВИ сервиса IGS были обработаны методом высокоточного-абсолютного местоопределения в статическом режиме с помощью 3-х программных продуктов: CSRS-PPP, MagicGNSS и gLAB.

Полученные результаты можно наблюдать на рисунках 1 - 4

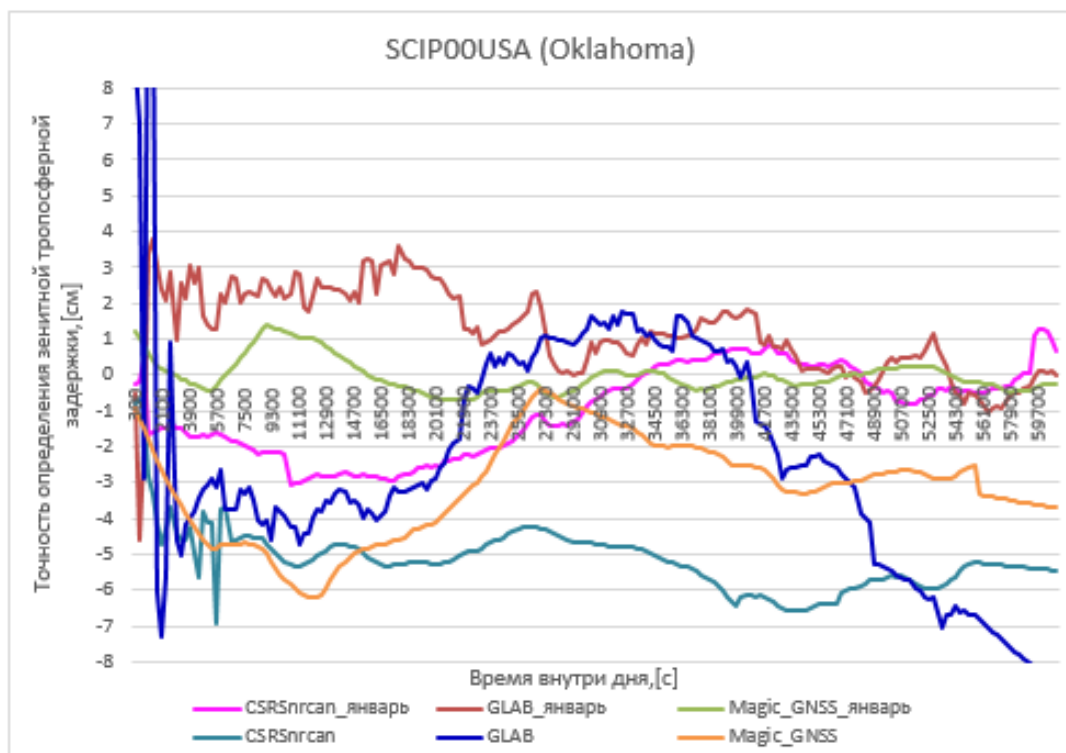


Рисунок - 1. Точность определения зенитной тропосферной задержки, полученной по измерениям станции SCIP00USA.

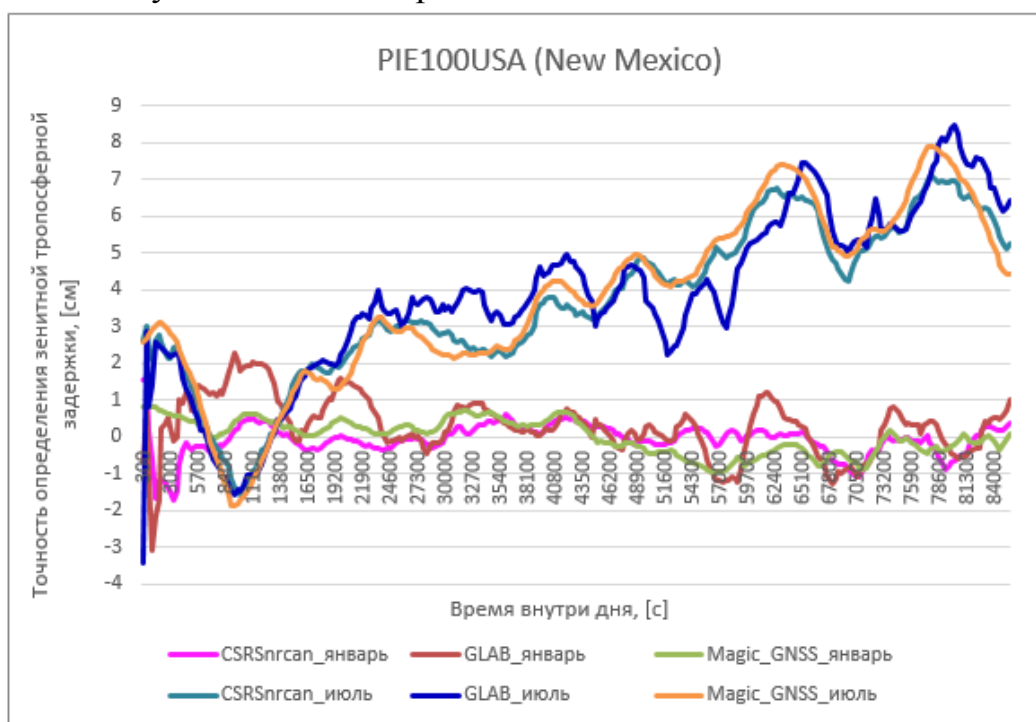


Рисунок - 2. Точность определения зенитной тропосферной задержки, полученной по измерениям станции PIE100USA.

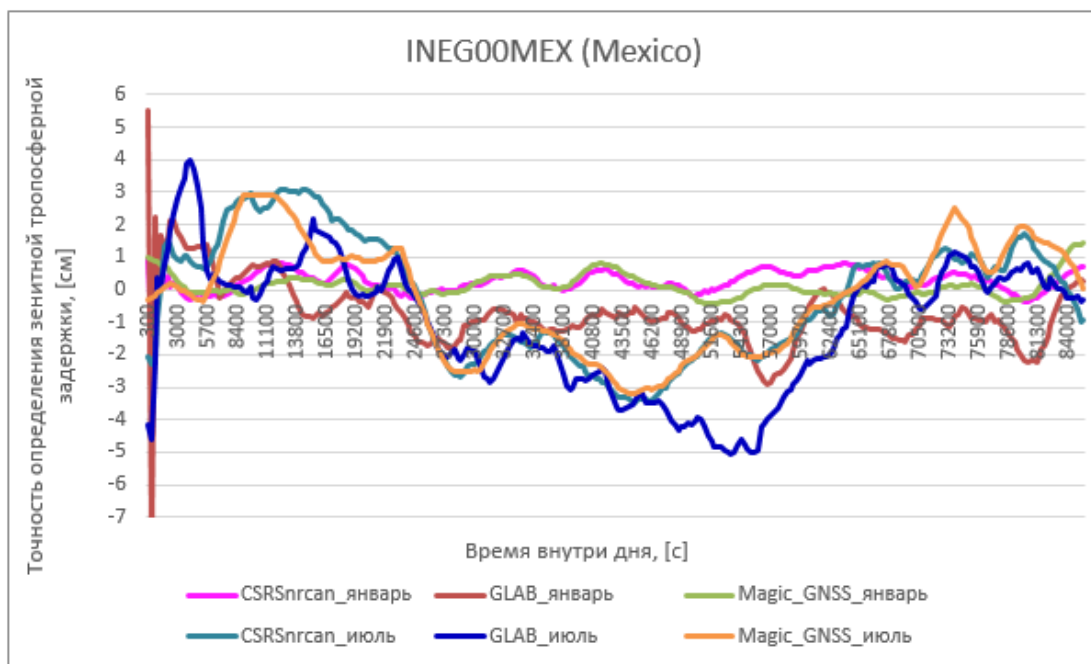


Рисунок - 3. Точность определения зенитной тропосферной задержки, полученной по измерениям станции INEG00MEX

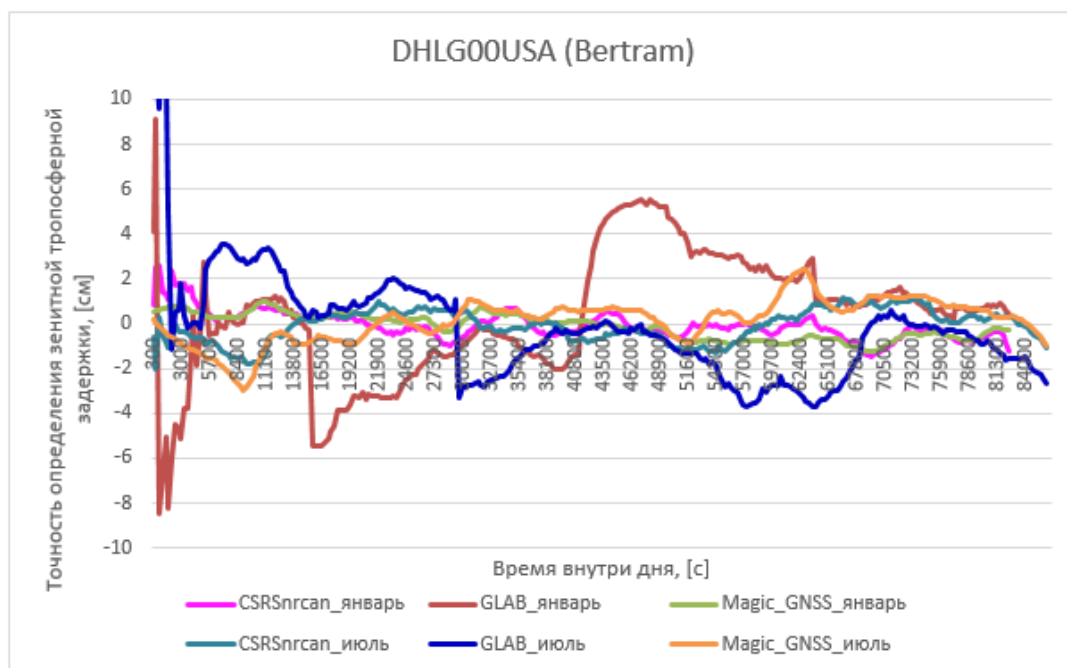


Рисунок – 4 Точность определения зенитной тропосферной задержки, полученной по измерениям станции DHLG00USA

В таблице 3 представлены значения RMS зенитной тропосферной задержки, полученные с использованием трех программных продуктов: CSRS-PPP, MagicGNSS и gLAB.

Таблица 3 – Точность оценки зенитной тропосферной задержки, [см]

	SCIP00USA, Оклахома, США		PIE100USA Нью-Мексико, США		INEG00MEX Мехико, Мексика		DHLG00USA, Бертрам,Техас, США	
	январь	июль	январь	июль	январь	Июль	январь	июль
CSRS	1.57	5.22	0.42	4.20	0.42	1.85	0.62	0.72
GLAB	2.16	4.25	0.84	4.46	1.29	2.28	2.81	2.47
Magic_GNS S	0.47	3.43	0.46	4.43	0.36	1.70	0.57	0.98

По данным представленным на рисунках 1-4 и в таблице 3 можно сделать следующие выводы:

1. При анализе результатов эксперимента, было выявлено, что точность зенитных тропосферных задержек, полученные при обработке навигационных измерений за 9 января несколько выше, точности зенитных тропосферных задержек, полученных при использовании навигационных измерений за 17 июля. Данная зависимость наблюдается при использовании навигационных измерений со всех наземных станций, кроме станции DHLG00USA. Вероятно, что модели, по которым в тестируемых программных продуктах происходит определение

тропосферной задержки[14,15,16], позволяют лучше оценить ее влажную составляющую в выбранных регионах при высоком значении температуры и относительно низкой влажности, или же при низком или среднем значениях температуры и средней влажности. Более характерно это проявляется в результатах, полученных по измерениям со станции PIE100USA за июль, когда среднесуточное значение температуры составляло $+27^{\circ}\text{C}$, а величина относительной влажности - 70%.

2. Онлайн - сервисы CSRS-PPP, MagicGNSS позволяют получить более точную оценку зенитной тропосферной задержки, чем программное обеспечение gLAB. Возможно, это связано с тем, что онлайн - сервисы CSRS-PPP, MagicGNSS используют модель GPT2w[17], которая базируется на соотношениях *Саастамойнена* для гидростатической составляющей зенитной тропосферной задержки, *Аскне* и *Норидуса* для «влажной» составляющей зенитной тропосферной задержки и погодной карте ERA-Interim, представляющей собой структурную географическую сетку с шагом в 1° , содержащую 2712600 коэффициентов разложения 10-ти метеопараметров [18]. В то время как программное обеспечение gLAB использует более простую модель - *UNB3m* [19], построенную на соотношениях Девиса [20,21] и содержащую погодную карту из 50 коэффициентов широтного разложения 6 метеопараметров. Что в свою очередь позволяет gLAB производить расчет при небольших вычислительных ресурсах, но влияет на точность определения зенитной тропосферной задержки.

Использование *GPT2w* является одной из причин, почему онлайн-сервисы получают оценку, наиболее приближенную к тропосферному продукту IGS.

Библиографический список

1. Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. – М.: Радиотехника, 2010. - 800 с.
2. Чукин В.В., Алдошкина Е.С., Вахнин А.В., Канухина А.Ю., Мельникова О.А. Мониторинг интегрального содержания водяного пара в атмосфере ГНСС сигналами // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2010. № 12. С. 51 - 60.
3. Jerrett D., Nash J. Potential Uses of Surface Based GPS Water Vapour Measurements for Meteorological Purposes // Physics and Chemistry of the Earth Part A Solid Earth and Geodesy, 2001, no. 26, pp. 457 - 461. DOI: [10.1016/S1464-1895\(01\)00083-7](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(01)00083-7)
4. Fernandes J., Lazaro C., Ablain M., Pires N. Improved wet path delays for all ESA and reference altimetric missions, Remote Sensing Environment, 2015, vol. 169, pp. 50 - 74. DOI: 10.1016/j.rse.2015.07.023
5. Никитин Д.П., Валайтите А.А. Алгоритм высокоточного абсолютного местоопределения по сигналам ГНСС для низкоорбитальных космических аппаратов // Электросвязь. 2016. № 11. С. 12 - 17.

6. Валайтите А.А., Никитин Д.П. Анализ возможности применения квази-зенитной спутниковой системы QZSS в качестве источника эфемеридно-временной информации для режимов высокоточного местоопределения // Труды МАИ. 2015. № 82. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=58806>
7. Dawidowicz K., Krzan G. Coordinate estimation accuracy of static precise point positioning using on-line PPP service, a case study // Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica, 2014, no. 49 (1), pp. 37 - 55. DOI: 10.1007/s40328-013-0038-0
8. Дембелов М.Г., Овдин М.Е. Влагосодержание тропосферы над пунктом наблюдения Усть-Баргузин // Известия Иркутского государственного университета. 2019. № 27. С. 32 - 45.
9. Lei Yang et al. Numerical Weather Prediction Based Troposphere Correction for Real Time Precise Point Positioning // Geo-spatial Information Science, 2013, no. 16, pp. 186 – 200.
10. Никитин. Д.П. Формирование и методы передачи высокоточной эфемеридно-временной информации для организации режима PPP в реальном времени // Телекоммуникации. 2012. № 6. С. 8 - 33.
11. Никитин Д.П., Валайтите А.А. Анализ качества высокоточной эфемеридно-временной информации для определения координат низкоорбитальных космических аппаратов // Электросвязь. 2016. № 11. С. 18 - 24.
12. GPS Satellite Ephemerides. Satellite & Station Clocks. In IGS Products. URL: <http://igs.org/products>

13. Wolfgang R. Dick, Daniela Thaller. IERS Annual Report 2017. International Earth Rotation and Reference Systems Service, Central Bureau, 2017, 207 p.
14. Агапов Р.В., Широкий С.М., Титов Е.В. Сравнение моделей для расчёта тропосферной задержки навигационных сигналов системы ГЛОНАСС // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2017. № 42. С. 3 - 10.
15. Huang C-Y., Liou Y-A., Chiang C-C., Lin Y-J. Reconstruction of 3-D Wet Refractivity Structure of the Troposphere Using Simulated GPS Measurements // Journal Photogrammetry and Remote Sensing, 2005, no. 10, URL: https://www.researchgate.net/publication/267413602_Reconstructing_3D_wet_refractivity_structures_of_the_lower_troposphere_from_GPS_measurements
16. Вовасов В.Е., Бетанов В.В., Герко С.А. Проверка методики калибровки двухчастотного навигационного приемника ГЛОНАСС с помощью фильтра калмановского типа // Труды МАИ. 2015. № 79. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=55831>
17. Ashraf Farah. Accuracy assessment study of UNB3m neutral atmosphere model for global tropospheric delay mitigation // Journal Artificial Satellites, 2015, vol. 50, no. 4. DOI: 10.1515/arsa-2015-0016
18. Leandro R., Santos M., Langley R. UNB Neural Atmosphere Models // Proceedings of the 2006 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, Monterey, CA, January 2006, pp. 564 - 573.
19. Bohm J. et al. Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere // GPS Solution, 2015, vol. 19, pp. 433 – 441.

20. Hurter F., Maier O. Tropospheric profiles of wet refractivity and humidity from the combination of remote sensing data sets and measurements on the ground // Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6 (3), pp. 4895 – 4940. DOI: 10.5194/amtd-6-4895-2013
21. Подкорытов А.Н. Высокоточное местоопределение в абсолютном режиме в ГНСС с использованием разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений // Труды МАИ. 2012. № 59. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=34845>