

## Обработка и анализ РСДБ-наблюдений космических аппаратов системы ГЛОНАСС комплексом «Квазар-КВО»

© В. В. Пасынков<sup>1</sup>, И. Ф. Суркис<sup>2</sup>, Е. В. Титов<sup>1</sup>, Д. А. Гулидов<sup>1</sup>, С. М. Широкий<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «НПК «СПП», г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

### Реферат

В статье изложен подход к решению проблемы повышения точности определения эфемерид ГЛОНАСС до уровня, обеспечивающего конкурентоспособность системы на мировом рынке соответствующих услуг. Подход основан на совместном использовании следующих «техник»: ГНСС, лазерная локация спутников ГЛОНАСС с помощью квантово-оптической системы и РСДБ-наблюдения спутников с дальнейшей совместной обработкой измерений. Показано, что необходимым условием для реализации предлагаемого подхода является процедура совмещения систем координат, используемых в перечисленных методах. Продемонстрирована возможность такого совмещения на примере совместного использования ГНСС-техники (апостериорные эфемериды), техники КОС и РСДБ.

В мае 2017 г. проведен эксперимент по наблюдению КА ГЛОНАСС радиотелескопами РТ-32 обсерваторий «Бадарь», «Светлое», «Зеленчукская» РСДБ-комплекса «Квазар-КВО». В связи с ограниченным приемным диапазоном радиотелескопов наблюдения проведены только в диапазоне L1 (18 см). Корреляционная обработка выполнена на Программном корреляторе РАН со специально доработанным программным обеспечением. Определены групповая и фазовая РСДБ-задержки сигнала.

В ходе анализа данных наблюдений ионосферная задержка учтена с помощью ионосферных карт полного электронного содержания, получаемых по данным ГНСС-приемников. Для расчета тропосферных задержек использовано несколько методов: объединенная в SINEX-файлах информация от разных источников данных, данных РСДБ-наблюдений и данных радиометров водяного пара; наиболее точными в данном эксперименте оказались данные SINEX-файлов. Параметры стандартов времени станций определены как по данным ГНСС-приемников с привлечением информации от КОС о дальности до КА, так и по РСДБ-наблюдениям.

В результате анализа показано, что достигнут миллиметровый уровень (6–18 мм) точности интерпретации новой навигационной функции РСДБ-задержки, полученной по сигналам системы ГЛОНАСС при работе РСДБ-станций по навигационному сигналу в одночастотном режиме (диапазон L1), и сантиметровой уровень точности определения рассогласования координат, формируемых с использованием различных техник (РСДБ — ГНСС — КОС). Разработаны предложения по совершенствованию РСДБ-техники при работе по навигационным сигналам КА системы ГЛОНАСС.

**Ключевые слова:** РСДБ-комплекс, «Квазар-КВО», параметры вращения Земли, всемирное время, РСДБ, колокация, ГЛОНАСС.

*Контакты для связи: Пасынков Владимир Викторович (pasynkov\_vv@mail.ru).*

**Для цитирования:** Пасынков В. В., Суркис И. Ф., Титов Е. В., Гулидов Д. А., Широкий С. М. Обработка и анализ РСДБ-наблюдений космических аппаратов системы ГЛОНАСС комплексом «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 61. С. 3–27.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.61.3-27>

## Processing and Analysis of VLBI Observations of GLONASS Spacecraft by Quasar VLBI Network

© V. V. Pasynkov<sup>1</sup>, I. F. Surkis<sup>2</sup>, E. V. Titov<sup>1</sup>, D. A. Gulidov<sup>1</sup>, S. M. Shirokiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC “Research-and-production corporation “Precision system and instruments”, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

### Abstract

The paper describes an approach to solving the problem of improving the accuracy of GLONASS ephemerides to a level that ensures the competitiveness of this system in the global market of relevant services. The approach is based on a combination of GNSS, satellite laser ranging (SLR) and VLBI observations of GLONASS satellites with joint data analysis. It shows that a necessary condition for the implementation of the approach is the procedure of alignment of coordinate systems used by the listed techniques. The possibility of such alignment is demonstrated by the example of the joint use of GNSS technology (a posteriori ephemerides), as well as the SLR and VLBI techniques.

In May 2017, an experiment was conducted to observe GLONASS satellites with RT-32 radio telescopes of the Badary, Svetloe, Zelenchukskaya observatories of the Quasar VLBI network. Due to the limited frequency range of radio telescopes the observations were carried out only in the L1 band (18 cm). Correlation processing was performed on the RASFX software correlator with specially modified software. The group and phase VLBI delays of the signal were determined.

During the analysis of the observational data, the ionospheric delay was taken into account using ionospheric maps of the total electronic content (TEC) obtained from GNSS receivers. Several methods were used to calculate tropospheric delays: SINEX information from different data sources, VLBI and water vapor radiometers (WVR) data; the most accurate data in this experiment turned out to be SINEX file data. The time scales parameters of the stations were determined both from GNSS receivers with the involvement of information from the SLR system about the range to the spacecraft, and from VLBI observations.

The analysis results show that a millimeter precision level (6–18 mm) of interpretation of the new VLBI delay navigation function is achieved. The delay is obtained during VLBI observations of the single-frequency (L1 band) GLONASS satellites navigation signals. Besides, there is attained a centimeter accuracy level of coordinates mismatch estimation, determined by using various techniques (VLBI – GNSS – SLR). Proposals have been developed to improve VLBI technology when working on GLONASS spacecraft navigation signals.

**Keywords:** Quasar VLBI Network, Earth Rotation Parameters, Universal Time, VLBI, colocation, GLONASS.

*Contacts:* Vladimir V. Pasynkov (*pasynkov\_vv@mail.ru*).

**For citation:** Pasynkov V. V., Surkis I. F., Titov E. V., Gulidov D. A., Shirokiy S. M. Processing and analysis of VLBI observations of GLONASS spacecraft by Quasar VLBI Network // Transactions of IAA RAS. 2022. Vol. 61. P. 3–27. <https://doi.org/10.32876/ApplAstron.61.3-27>

## Введение

На современном этапе развития глобальных навигационных систем, в том числе ГЛОНАСС, актуальной является задача достижения дециметровой точности определения эфемерид навигационных КА (НКА) для реализации оперативного режима навигационного обеспечения потребителя и сантиметровой точности — для решения задач потребителя в апостериорном режиме. Иными словами, для обеспечения конкурентоспособности ГЛОНАСС на мировом рынке соответствующих услуг ошибки эфемерид НКА (СКО) не должны превышать 10 и 2 см в оперативном и апостериорном режиме соответственно.

Основные усилия при достижении требуемой точности ГЛОНАСС направлены на совершенствование следующих составляющих:

- космического комплекса в части конструкции НКА и системы его управления, навигационных сигналов, бортовых стандартов времени и частоты, бортовых средств измерений и др.;
- наземного сегмента космического комплекса, включая наземные средства измерений;
- математических моделей движения НКА, измерений и параметров среды распространения сигналов, включая технологию получения и обработки измерений;
- видов обеспечения системы (эфемеридно-временного, геодезического, геодинамического и др.).

Предварительный анализ всей совокупности факторов, вносящих погрешность в навигационное решение, в том числе исходных геодезических данных и геодинамических параметров, а также случайных и систематических ошибок измерений, ошибок моделирования тропосферных и ионосфер-

ных задержек, параметров движения НКА и т. д. показывает, что для достижения требуемой точности эфемерид НКА ошибки определения геодинамических параметров (Всемирного времени и координат полюса Земли) и геодезических данных (положение геоцентра, точность систем координат (СК), в которых определены координаты средств измерений), непосредственно влияющих на точность эфемерид, в ближайшей перспективе не должны превышать 0.3–0.6 см (СКО).

С использованием РСДБ-технологии возможно получение полного ряда геодинамических параметров:

- координат небесного полюса;
- поправки Всемирного времени относительно координированного времени;
- координат полюса Земли.

Для получения геодинамических данных РСДБ-техника является достаточной и наиболее точной. Однако для получения, например координат полюса Земли, необходимо проведение суточной сессии многобазового интерферометра, и при использовании такого подхода в оперативном эфемеридном обеспечении системы ГЛОНАСС требуется передача в реальном времени огромных объёмов информации, что нерационально. Процесс сбора и обработки данных суточных сессий занимает существенное время, что приводит к потере актуальности получаемой информации, причем те же координаты мгновенного полюса Земли с эквивалентно высокой точностью могут быть рассчитаны непосредственно в задаче определения эфемерид НКА.

Единственным источником информации о Всемирном времени с требуемой точностью, необхо-

димой ГЛОНАСС, в настоящее время являются измерения РСДБ-станций, для чего достаточно проведения, оперативного сбора и обработки 3–4 интенсивных (1–2-часовых) сессий в сутки однобазового интерферометра с долготным разнесением.

С модернизацией сети «Квazar-КВО» и созданием сети с радиотелескопами на базе тринадцатиметровых антенн (РТ-13) стало возможным проведение ежедневно до пяти часовых интенсивных сессий по получению Всемирного времени, при этом сбор и обработка информации реализованы в квазиреальном масштабе времени на основе волоконно-оптических каналов связи с операционной задержкой не более 3 ч.

В GPS и Galileo данная проблема менее актуальна, т. к. наземный сегмент этих систем включает глобальную сеть станций и обеспечивается возможность поддержания в актуальном состоянии оценки Всемирного времени в линейной модели вида

$$\Delta UT1 = \Delta UT1_0 + DD \cdot (t - t_0).$$

Если точность расчета эксцесса (или длительности суток) DD является высокой, то приведенная модель может быть актуальной на протяженных интервалах времени, а её актуализация происходит на предыстории с допустимыми операционными задержками.

Для ГЛОНАСС в настоящее время и в ближайшей перспективе доступна только региональная сеть наземных станций и интервал актуальности модели Всемирного времени может не превышать одной недели, а интервал актуализации в предыстории может отставать от операционного цикла эфемеридного обеспечения до двух суток. Поэтому в ГЛОНАСС существует проблема получения и поддержания в актуальном состоянии оценки Всемирного времени.

На современном этапе имеется технологическая возможность колокации расчета эфемерид навигационных спутников и полного ряда геодинамических параметров в рамках единого технологического цикла эфемеридного обеспечения. Достигаемый при этом эффект состоит в получении эфемерид и актуальных геодинамических данных без значимых операционных задержек с требуемой точностью, превосходящей точность зарубежных аналогов.

Для реализации технологии колокации необходимо методическое согласование координат и систем отсчета времени, а также параметров моделей обработки разнотипных данных (измерений текущих навигационных параметров КА и измерений внегалактических радиоисточников) в рамках единой задачи.

Таким образом, оказывается, что наилучшая точность оценок геодинамических параметров (0.3–0.5 см в линейной мере) достигается только

при совместной обработке ГНСС- и РСДБ-измерений. В результате возникает дополнительная фундаментальная проблема совмещения систем координат, используемых ГНСС- и РСДБ-техниками. Термин «совмещение систем координат» в данном контексте означает формализацию соотношений, позволяющих определить взаимно однозначную зависимость координат любых объектов в совмещаемых системах координат с необходимой точностью, включая координаты станций, размещенных на Земле. Существующий в данной предметной области практический опыт позволяет утверждать, что единственной технологией, обеспечивающей требуемую точность положения координат станций (СКО лучше 0.6 см) в привязке к центру масс Земли, является лазерная дальнометрия, т. е. технология, основанная на использовании измерений дальности с помощью квантово-оптических станций (КОС). С учетом сказанного, при решении задачи повышения точности эфемерид НКА ГЛОНАСС существует фундаментальная проблема совмещения систем координат, используемых в техниках обработки измерений ГНСС, РСДБ и КОС.

Сложность и важность решения проблемы совмещения СК, формируемых различными информационными технологиями или, как принято говорить на профессиональном сленге, «техниками» (ГНСС, РСДБ, КОС), осознается специалистами, в том числе и на международном уровне, а именно: сформулированная фундаментальная проблема признается одной из важнейших в проекте GGOS (Global Geodetic Observing System). Задача этого проекта — колокация (совмещение) всех представленных на сегодняшний день техник измерений.

Представляется очевидным, что необходимым условием решения сформулированной фундаментальной проблемы является создание пунктов, включающих расположенные в непосредственной близости измерительные станции, реализующие различные по своей природе измерения (ГНСС, РСДБ, КОС) и DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite), техники уточнения геоцентрических систем координат на основе обработки доплеровских измерений, а также создание колоцированного КА; например, в проекте GGOS планируется создание КА GRASP (Gravitational References for Sensimotor Performance), объединяющего в бортовом комплексе все четыре техники.

Объединение нескольких техник на Земле позволяет определять в реальном времени расстояния между геодезическими маркерами средств различных информационных технологий, находящихся на видимом удалении друг от друга, и тем самым обеспечивать корреляционные связи для обработки данных различных средств в одном

решении. Совмещение нескольких техник на борту позволяет обрабатывать измерения всех имеющихся средств совместно, то есть получать не только координаты станций, используя достоинства каждой техники. Так, например, РСДБ позволяет определять ориентацию и масштаб СК, КОС — положение геоцентра, DORIS — движение геоцентра, ГНСС обеспечивает лучшую относительную привязку координат станций и определение геодинамических параметров. Иными словами, РСДБ дает лучшее Всемирное время, координаты небесного полюса и параметры прецессии, ГНСС — координаты мгновенного полюса Земли.

В данной статье описаны методы и алгоритмы, а также приведены результаты экспериментов по совмещению СК, используемых в технологиях ГНСС — КОС — РСДБ, с применением новой навигационной функции — РСДБ-задержки, полученной по сигналам ГЛОНАСС.

### Современное состояние навигационного поля ГЛОНАСС в сравнении с зарубежными ГНСС

На рис. 1 представлены графики, характеризующие точность навигационного поля ГЛОНАСС в сравнении с другими ГНСС (2021 г.) в виде интегрального показателя — эквивалентной погрешности псевдодальности (ЭППД). Представленные графики показывают, что зарубежные ГНСС за истекший период (примерно за последние 8–10 лет)

сделали качественный скачок в точности навигационного поля, а система ГЛОНАСС имеющийся потенциал не реализовала. Наибольший прогресс в точности бортовых эфемерид достигнут в китайской Бейдоу-3, которая демонстрирует беспрецедентно высокий уровень точности — менее 10 см — достигаемый определенным комбинированием измерений регионального наземного сегмента и бортовых межспутниковых измерений, который существенно выше, чем, например, достигаемый в европейской Galileo, имеющей глобальный сегмент наземных станций. Уровень технических характеристик (ТХ) измерений в Бэйдоу-3 для получения демонстрируемых ТХ эфемерид оценивается на уровне 2 см. Заметен регресс в точности бортовых эфемерид GPS, в которых на блоках нового поколения ИФ эфемериды почти в 2 раза хуже, чем на блоках предыдущего поколения.

Декомпозируя погрешность навигационного поля на две основные составляющие — погрешность бортовых эфемерид (рис. 2) и частотно-временных поправок (рис. 3) — можно сделать вывод, что погрешность навигационного поля всех ГНСС (кроме GPS) определяется погрешностями частотно-временного обеспечения (ЧВО).

При анализе ЧВО дополнительно проведен анализ характеристик бортовых стандартов в виде вариаций поправок к бортовым шкалам КА (рис. 4–8) из которого следует, что в целом уровень

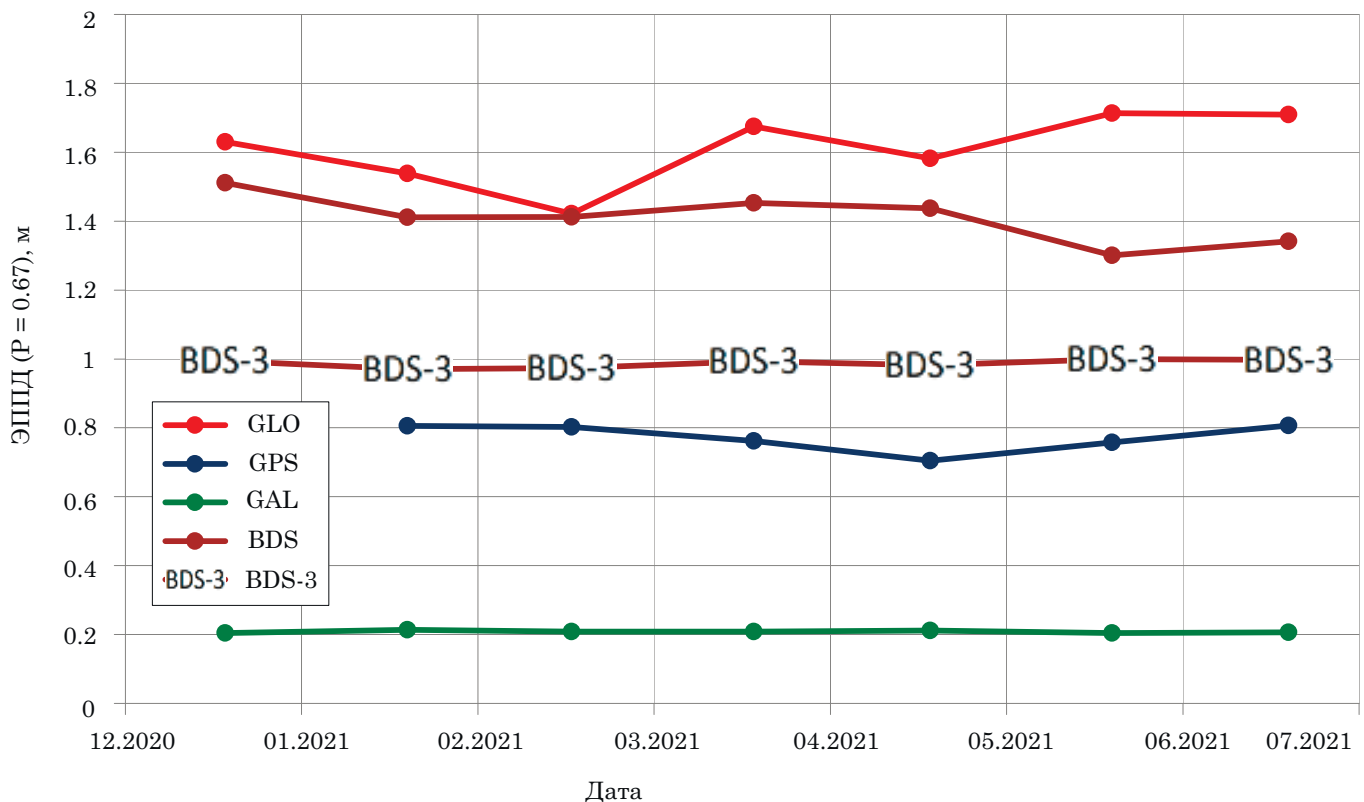


Рис. 1. Погрешность навигационного поля ГНСС, 2021 г.

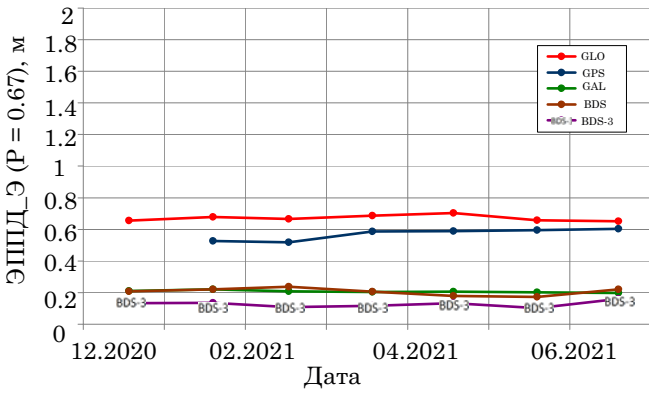


Рис. 2. Погрешность бортовых эфемерид ГНСС, 2021 г.

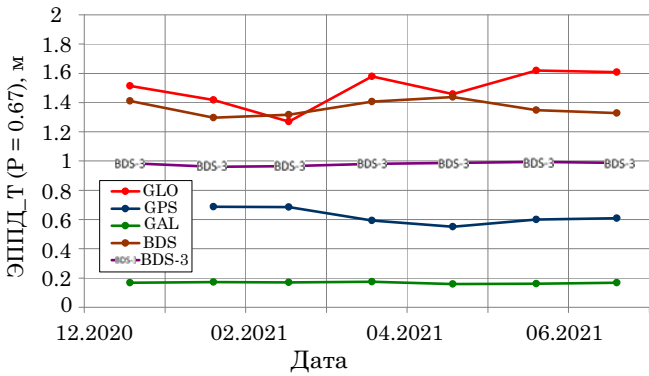


Рис. 3. Погрешность частотно-временных поправок ГНСС, 2021 г.

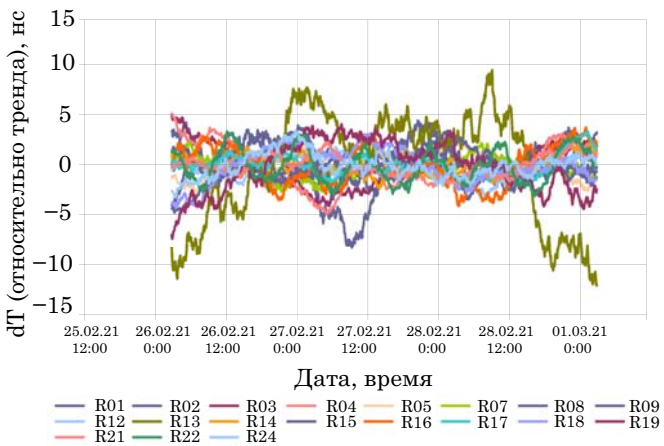


Рис. 4. Поправки к БШВ КА ГЛОНАСС

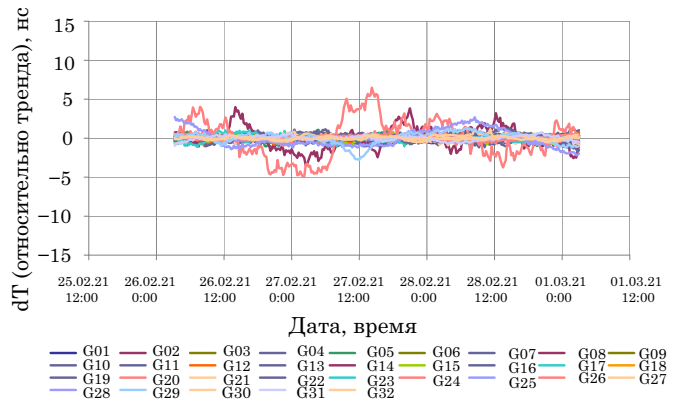


Рис. 5. Поправки к БШВ КА GPS

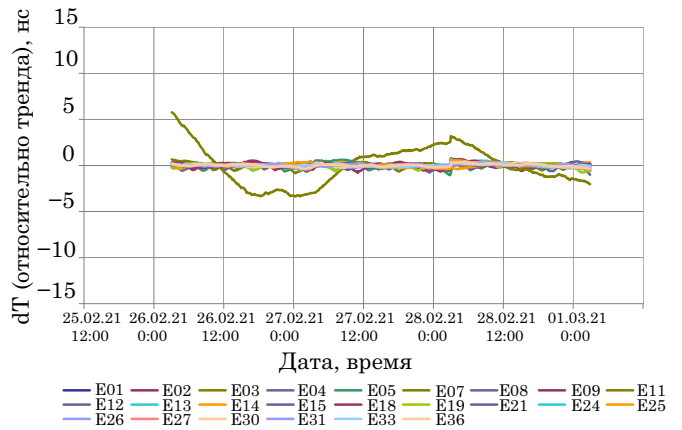


Рис. 6. Поправки к БШВ КА Galileo

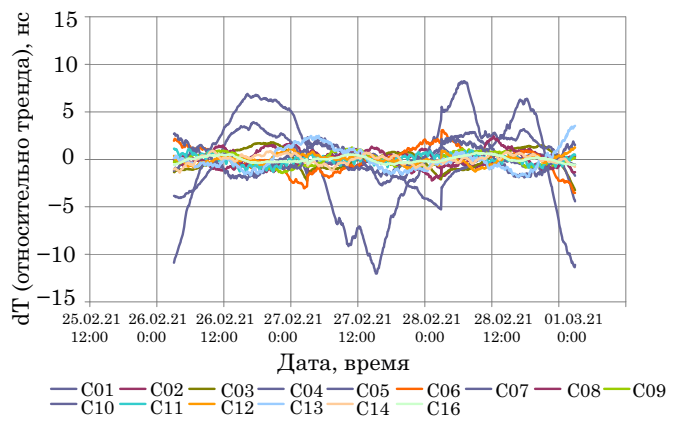


Рис. 7. Поправки к БШВ КА BDS-2

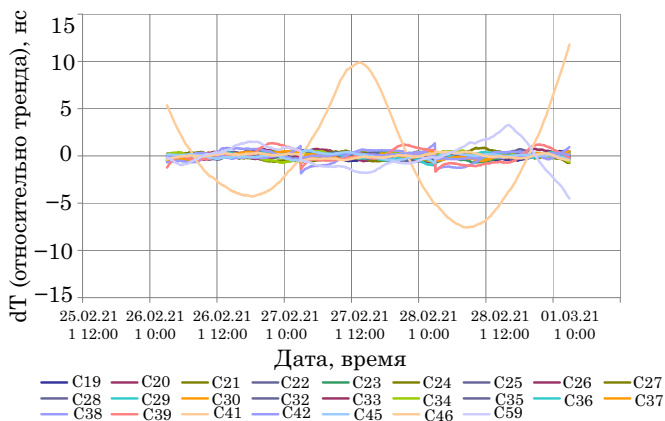


Рис. 8. Поправки к БШВ КА BDS-3

характеристик навигационного поля и ЧВО определяется уровнем характеристик бортовых стандартов частоты.

По точностным характеристикам бортовые стандарты КА системы ГЛОНАСС в настоящее время соизмеримы только с BDS-2 и значительно уступают КА Galileo. При этом следует отметить, что фактический уровень точности частотно-временного обеспечения для зарубежных ГНСС существенно (в 2–3 раза) ниже ожидаемого, что свидетельствует о том, что точностные характеристики измерительных средств, применяемых в зарубежных ГНСС, отстают от точности хранения частоты на борту НКА.

Для дальнейшего совершенствования ЧВО при достижении ТХ БСУ на уровне  $(2-5) \cdot 10^{-15}$  необходимо повысить точность запросно-беззапросных (или беззапросных в зависимости от применяемой технологии ЧВО) измерений до уровня 2–5 см. В случае реализации планов по внедрению пассивного водородного стандарта частоты на борту КА нового поколения ГЛОНАСС необходимо совершенствовать характеристики перспективных средств измерений.

### Некоторые проблемы геодезического обеспечения ГЛОНАСС на современном этапе

Согласно ранее принятым решениям для обеспечения необходимой точности бортовых эфемерид ГЛОНАСС используются исходные геодезические данные (ИГД) расширенного состава, включающие:

- геоцентрические координаты на фиксированную эпоху за вычетом приливов в твердом теле Земли (с учётом постоянной части прилива), океанической и атмосферной нагрузки и полярного прилива;

- скоростей станции, обусловленных движением тектонических плит.

В настоящее время в ГЛОНАСС реализована редакция ПЗ-90.11, которая на момент ввода в 2012 г. характеризовалась сантиметровой точно-

стью как по знанию ИГД расширенного состава, так и по уровню отличия от Международной СК ITRF.

Текущие ИГД НС были получены в 2010–2012 гг. по собственным измерениям средств НС ГЛОНАСС посредством относительной привязки к пунктам IGS с использованием измерений и известных координат в редакции ITRF-2008. Методическая точность получения таким способом мгновенных координат оценивается на уровне 1 см (СКО), однако скорости станций, являющиеся необходимым элементом ИГД с необходимой точностью 1 мм/год таким способом получить не представляется возможным.

Как следствие, к середине 2021 г. ИГД расширенного состава для средств наземного комплекса ГЛОНАСС деградировали и для отдельных станций достигли или даже превышают 10 см, что не соответствует заявленной точности ПЗ-90 в редакции ПЗ-90.11.

Необходимым условием решения такой задачи является сгущение сетей станций в восточной части РФ, особенно на Амурской и Охотской малых тектонических плитах. Следует отметить, что низким уровнем определения точности движения тектонических плит в восточной части РФ обладает не только ПЗ-90.11, но и принятая за «образцовую» СК ITRF-2014, основной причиной чего является именно недостаточное число станций, заявленных для международного сотрудничества на территории РФ (всего 19, из которых территориально разнесённых лишь 14).



Рис. 9. Амурская малая тектоническая плита



Рис. 10. Охотская малая тектоническая плита

На рис. 9, 10 представлены текущий состав ГНСС-станций соответственно на Амурской (единственная станция Хабаровск завершила работу в 2008 г. и в настоящее время Российских станций нет) и Охотской (три станции: Южно-Сахалинск, Магадан и Петропавловск-Камчатский) малых тектонических плитах. Для полноценного описания движения тектонической плиты необходимо как минимум семь станций, равномерно разнесённых по пространству плиты. Отсутствие необходимого числа станций приводит к дефектам.

Для парирования данного недостатка представляется целесообразным расширить международное сотрудничество в части участия пунктов фундаментальных астрономо-геодезических сетей Роскосмоса при выводе новых версий ITRF и ПЗ-90.

### Эксперимент «Совмещение-2017»

В ряде международных проектов, таких как GGOS, LARGE-1 (ILRS Study Group), экспериментально установлено и подтверждено взаимное расхождение систем координат станций, формируемых различными техниками: РСДБ, ГНСС, КОС и DORIS на уровне нескольких сантиметров, что превышает требуемый уровень к эфемеридам и параметрам вращения Земли и является существенным препятствием в достижении заданной точности даже оперативных эфемерид.

КА системы ГЛОНАСС конструктивно является дважды колоцированным КА, так как все КА оснащаются ретрорефлекторными панелями. В ре-

зультате развертывания системы Galileo появилась вторая система, полностью оснащённая ретрорефлекторными панелями. Ниже будут приведены результаты совместного уточнения параметров Гельмерта между техниками ГНСС и КОС, полученные при совместной обработке КОС по КА ГЛОНАСС и Galileo.

Подключение к КА ГЛОНАСС третьей техники — РСДБ — обеспечивает использование созданных в РФ узлов колокации на базе сети «Квазар-КВО» в интересах решения проблемы точности ГЛОНАСС.

19 января 2017 г. впервые в истории ГЛОНАСС на РСДБ-комплексе «Квазар-КВО» были проведены РСДБ-наблюдения КА ГЛОНАСС (№ точки — 3, НКУ — 744). Наблюдения были повторены в марте того же года.

Предварительный анализ первых результатов обработки измерений, получаемых станциями РСДБ по сигналам НККА ГЛОНАСС, показал, что возникают дополнительные проблемы, препятствующие высокоточной оценке параметров преобразования Гельмерта. Эти проблемы обусловлены следующими факторами:

- фактическим оснащением РТ-32 и возможностью работы только по сигналу в частотном диапазоне L1;

- необходимостью интерпретации задержки распространения сигнала при «работе» по НККА ГЛОНАСС с точки зрения учета влияния тропосферной и особенно ионосферной рефракции, имеющей наибольший вклад;

- необходимостью повышения точности корреляционной обработки результатов измерений на программном корреляторе ИПА РАН и математической интерпретации РСДБ-задержки при работе по НККА ГЛОНАСС с точки зрения учета влияния ошибок навигационного сигнала ГЛОНАСС.

На подготовительном этапе эксперимента в январе – марте 2017 г. были выбраны типы излучаемых сигналов КА ГЛОНАСС для работы РТ-32 и подготовлено необходимое программное обеспечение, а в мае 2017 г. по шести НККА ГЛОНАСС тремя РТ-32 из состава «Квазар-КВО» был проведен эксперимент «Совмещение – 2017». Первая фаза эксперимента на трёх базах, образованных пунктами «Бадары», «Зеленчукская» и «Светлое», проведена в промежутке 126–131 суток 2017 г., вторая фаза — в период 135–142 суток 2017 г.

Целью эксперимента «Совмещение – 2017» было решение следующих задач:

- корреляционная обработка и математическая интерпретация нового измеряемого параметра — временной задержки от НККА;

- оценка параметров рефракции в ионосфере и тропосфере по измерениям различных техник;

- оценка рассогласования времени опорных часов станций по двум техникам;

— оценка рассогласования систем координат, формируемых тремя техниками и геодезическим способом.

НКА системы ГЛОНАСС выбирались из условия проводимого эксперимента LARGE-4 по технике КОС, по которым обеспечивалось максимальное количество сеансов международной сети лазерной локации, а именно: системные точки R02, R07, R09, R11, R18, R21, где R02 — это КА третьего поколения «Глонасс-К», а стальные — КА второго поколения «Глонасс-М».

Корреляционная обработка проведена на программном корреляторе РАН (корреляторе RASFX) (Суркис, 2012, С. 84–88; Суркис, 2018, С. 1–9). Обработка результатов измерений проведена на программном обеспечении авторов доклада.

При проведении эксперимента использовались следующие технические средства обсерваторий комплекса «Квазар-КВО».

РАО «Светлое»: РСДБ (РТ-32, номер IVS-7380), ГНСС (Javad-svt1, номер в сети IGS, РНПИ, kv\_3-GTR51 — в тестовом режиме), КОС («Сажень-ТМ-БИС», 1888 — номер в сети IIRS), высокостабильный стандарт частоты (ВСЧ-Ч1003), радиометр водяного пара (РВП), метеостанция РТ-13 (номер IVS-9382);

РАО «Бадарь»: РСДБ (РТ-13, номер IVS-7384 и РТ-32, номер IVS-7382), ГНСС (Javad-badg-станция сети IGS, РНПИ, kv\_1-GTR51), КОС («Сажень-ТМ-БИС», 1890 — номер в сети IIRS), ВСЧ, РВП, метеостанция;

РАО «Зеленчукская»: РСДБ (РТ-13, номер IVS-7383, РТ-32, номер IVS-7381), ГНСС (Javad-zeck, РНПИ, kv\_2 -GTR51), КОС («Сажень-ТМ-БИС», 1889 — номер в сети IIRS), ВСЧ, РВП, метеостанция.

### Корреляционная обработка сигналов при работе РСДБ-станций по сигналам ГЛОНАСС

Предвычисление задержек для корреляционной обработки было выполнено аналогично вычислению теоретических задержек в процессе анализа результатов обработки (см. следующий раздел).

В ходе корреляционной обработки были получены взаимно корреляционные спектры сигналов трех баз с частотным разрешением 15.625 кГц на периодах накопления 1 сек. Пример спектра приведен на рис. 11. Спектр сигнала КА ГЛОНАСС имеет сложную форму, хорошо заметны зона шириной около 0.5 МГц (соответствует «грубому» сигналу КА) и зона шириной около 8 МГц (соответствует «точному» сигналу).

Постпроцессорное программное обеспечение коррелятора RASFX было дополнено пакетом программ определения задержек модулированных сигналов КА. Коррелятором для каждого периода накопления вычислялись фазовая и групповая задержки.

Групповая задержка определяется для шумоподобных сигналов по зависимости фазы от частоты во взаимно-корреляционном спектре и точность ее определения обратно пропорциональна соотношению сигнал шум и ширине полосы излучения сигнала. Точность определения групповой задержки КА ГЛОНАСС на интервале накопления 1 сек для разных баз и разных моментов времени составила 0.5–2 нс (СКО).

Фазовая задержка может быть определена для модулированных сигналов. Точность определения фазовой задержки обратно пропорциональна несущей частоте сигнала. Оценка СКО фазовой задержки составляет не хуже 10 пс.

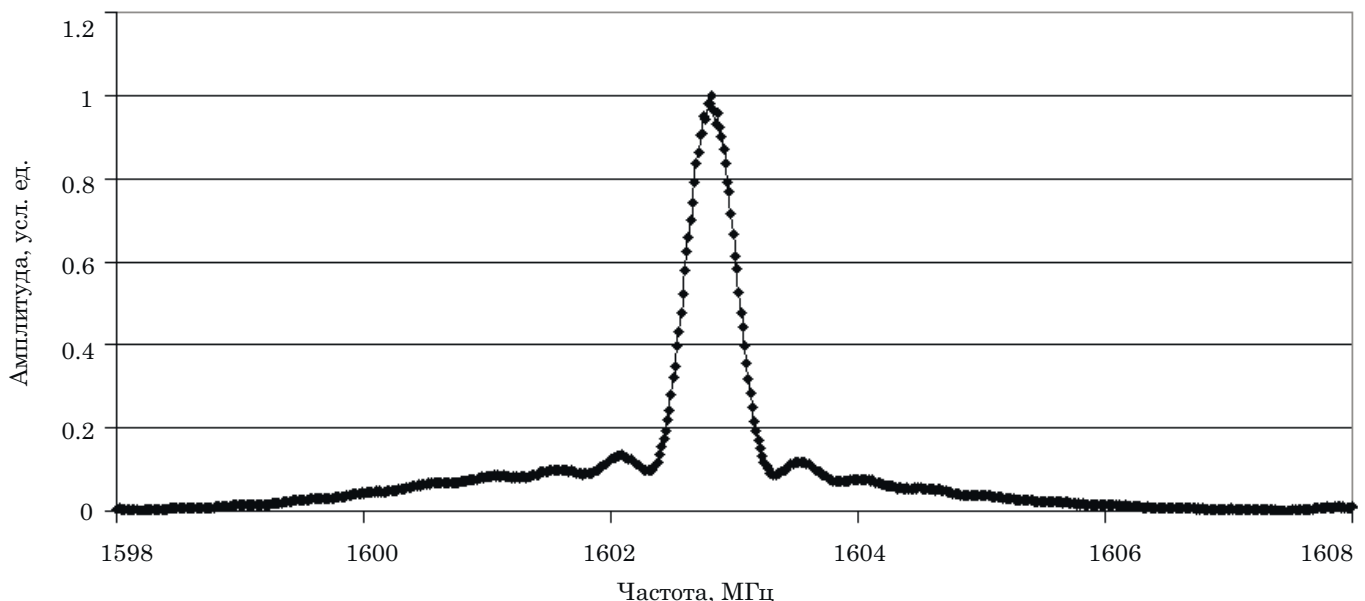


Рис. 11. Взаимно корреляционный спектр сигнала КА ГЛОНАСС, полученный на базе «Светлое» — «Зеленчукская»



Неоднозначность фазовой задержки  $1/f$  (где  $f$  — несущая частота), составляющая 0.625 нс для КА ГЛОНАСС диапазона L1, разрешалась в ходе последующего анализа данных, в том числе с привлечением данных групповой задержки.

### Математическая модель теоретической задержки при работе РСДБ-станций по сигналам ГЛОНАСС

Эффект запаздывания сигналов в РСДБ-наблюдениях спутника реализован двумя способами: численно и аналитически. Аналитическая модель (Иванов, 2017, С. 3) следующая.

В геоцентрической системе координат  $\vec{R}(t)$  — радиус-вектор спутника,  $\vec{V}(t)$  — скорость его изменения,  $\vec{r}_1(t), \vec{r}_2(t), \vec{v}_1(t), \vec{v}_2(t)$  — радиус-векторы первой и второй станции базы и скорости их изменения соответственно.

В момент времени  $t_0$  спутник, находясь в точке  $\vec{R}(t_0)$ , излучает сигнал, который в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  принимают станции, находящиеся в точках  $\vec{r}_1(t_1)$  и  $\vec{r}_2(t_2)$  соответственно.

Геометрическая задержка равна

$$\tau = t_2 - t_1 = (t_2 - t_0) - (t_1 - t_0).$$

При этом

$$(t_1 - t_0) = \frac{1}{c} |\vec{R}(t_0) - \vec{r}_1(t_1)|,$$

$$(t_2 - t_0) = \frac{1}{c} |\vec{R}(t_0) - \vec{r}_2(t_2)|,$$

где  $c$  — скорость света.

Считая движение спутника и станций линейным на малых интервалах времени, получим:

$$(t_1 - t_0) = \frac{1}{c} |\vec{R}(t_1) - (t_1 - t_0)\vec{V}(t_1) - \vec{r}_1(t_1)|,$$

$$(t_2 - t_0) = \frac{1}{c} |\vec{R}(t_1) - (t_1 - t_0)\vec{V}(t_1) - \vec{r}_2(t_1) - (t_2 - t_1)\vec{v}_2(t_1)|.$$

Введем обозначения  $\vec{l}_1 = \vec{R}(t_1) - \vec{r}_1(t_1)$ ,  $\vec{l}_2 = \vec{R}(t_1) - \vec{r}_2(t_1)$ . Тогда

$$(t_1 - t_0) = \frac{1}{c} |\vec{l}_1 - (t_1 - t_0)\vec{V}(t_1)|, \quad (1)$$

$$(t_2 - t_0) = \frac{1}{c} |\vec{l}_2 - (t_1 - t_0)\vec{V}(t_1) - (t_2 - t_1)\vec{v}_2(t_1)|. \quad (2)$$

Так как  $|(t_1 - t_0)\vec{V}(t_1)| \ll |\vec{l}_1|$  и  $|(t_1 - t_0)\vec{V}(t_1) - (t_2 - t_1)\vec{v}_2(t_1)| \ll |\vec{l}_2|$ , то

$$(t_1 - t_0) = \frac{1}{c} \left( |\vec{l}_1| - \frac{(t_1 - t_0)\vec{l}_1 \vec{V}(t_1)}{|\vec{l}_1|} \right), \quad (3)$$

$$(t_2 - t_0) = \frac{1}{c} \left( |\vec{l}_2| - \frac{(t_1 - t_0)\vec{l}_2 \vec{V}(t_1) - (t_2 - t_1)\vec{l}_2 \vec{v}_2(t_1)}{|\vec{l}_2|} \right). \quad (4)$$

Переход от формул (1), (2) к формулам (3), (4) осуществляется с ошибкой в единицы миллиметров (для системы ГЛОНАСС — наземные РСДБ-станции).

Введем обозначения  $q_1 = \frac{\vec{l}_1 \vec{V}(t_1)}{|\vec{l}_1|c}$ ,  $q_2 = \frac{\vec{l}_2 \vec{V}(t_1)}{|\vec{l}_2|c}$ ,  $p = \frac{\vec{l}_2 \vec{v}_2(t_1)}{|\vec{l}_2|c}$ .

$$\text{Тогда} \quad (t_1 - t_0) = \frac{|\vec{l}_1|}{c(1+q_1)},$$

$$(t_2 - t_0) = \frac{|\vec{l}_2|}{c} - (t_1 - t_0)q_2 - (t_2 - t_1)p.$$

В результате получается финальная формула для вычисления задержки:

$$\tau = \frac{|\vec{l}_2| - |\vec{l}_1| + |\vec{l}_1| \frac{q_1 - q_2}{1+q_1}}{c(1+p)}.$$

Численная модель РСДБ-задержки при работе станций по сигналам ГНСС представляется в виде соотношения

$$\tau_{1,2} = \frac{D_1^i(t', t_1) - D_2^i(t', t_2)}{c},$$

где  $\tau_{1,2}$ ,  $t'$  — время отправки сигнала  $i$ -м КА,  $t_1$  и  $t_2$  — время приема сигнала 1-ой и 2-ой станциями РСДБ соответственно,  $D_1^i$  и  $D_2^i$  — расстояния, пройденные сигналом  $i$ -го КА до первой и второй станции РСДБ соответственно:

$$D_1^i(t', t_1) = |\vec{r}_{\text{НКА}}^i(t') - \vec{r}_1^i(t_1)|,$$

$$D_2^i(t', t_2) = |\vec{r}_{\text{НКА}}^i(t') - \vec{r}_2^i(t_2)|,$$

где  $\vec{r}_{\text{НКА}}^i$  — радиус вектор  $i$ -го НКА в момент излучения сигнала  $t'$  в инерциальной CRF,  $\vec{r}_1^i(t_1)$  и  $\vec{r}_2^i(t_2)$  — координаты первой и второй станций в CRF в моменты приема сигнала  $i$ -го НКА  $t_1$  и  $t_2$  соответственно. Из приведенных зависимостей следует, что измеренное значение для РСДБ-задержки содержит поправку, обусловленную разностью показаний часов первой и второй станций, которую следует включать в состав уточняемых параметров при решении различных задач оценивания.

Экспериментальная отработка приведенных моделей показала согласование аналитической и численной модели геометрической задержки на ожидаемом миллиметровом уровне точности.

### Учет ионосферной рефракции в эксперименте «Совмещение-2017»

По условиям эксперимента радиотелескопы РТ-32, с использованием которых проводились измерения по НКА системы ГЛОНАСС R02, R07, R09, R11, R18, R21, были оснащены для работы только в частотном диапазоне ГЛОНАСС. Поэтому ключевой проблемой был поиск способа компенсации ионосферной погрешности.

Учитывая условия проведения эксперимента, в качестве возможных способов компенсации ионосферной погрешности рассматривались использование ионосферных карт полного электронного содержания (ПЭС) и применение моделей ионосферы.

Ионосферные карты ПЭС формируются центрами анализа ГНСС и публикуются в формате IONEX (IONEX format). Основным недостатком карт ПЭС является их низкое пространственно-временное разрешение, которое составляет по широте  $2.5^\circ$ , по долготе —  $5^\circ$ , по времени — 2 ч. Заявленная погрешность карт ПЭС составляет 2–10 TECU ( $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$ ) (Wilson, 1995; Mannucci, 1998), что при пересчете для частотного диапазона ГЛОНАСС ( $\sim 1.6 \text{ ГГц}$ ) будет соответствовать ошибке псевдодальности 0.31–1.57 м. Последующие расчеты по данным центра анализа CODE подтвердили заявленный уровень точностных характеристик.

Модели ионосферы условно можно разделить на три группы:

- теоретические;
- эмпирические;
- гибридные.

Теоретические модели ионосферы основаны на решении сложной системы магнитогидродинамических и кинетических уравнений, описывающих физические процессы образования, существования и динамики развития ионосферы. На текущем этапе развития данные модели из-за неполноты знаний об ионосфере и принятых допущений пока не обладают достаточной точностью (Поляков, 1978; Черняков, 2003).

Обобщение экспериментальных данных о состоянии ионосферы путем их статистической обработки на длительных интервалах времени характеризует эмпирические модели. При таком подходе выявляются и учитываются лишь систематические вариации ионосферы, вследствие чего эмпирические модели позволяют описывать усредненное (приближенное) состояние ионосферы, что может сказываться на точности их применения. В частности в ГНСС GPS и BeiDou применяется модель ионосферы Klobuchar (ICD GPS, 1997; ICD Beidou, 2012; Klobuchar, 1987), точность которой составляет  $\sim 50\%$  (Антонович, 2005). При проведении эксперимента были проведены расчеты с использованием данной модели, которые подтвердили ее неудовлетворительные точностные характеристики на интервале исследований.

Гибридные модели ионосферы построены на базе теоретических моделей путем оптимизации структуры последних и используют коррекцию по экспериментальным данным о состоянии ионосферы (Коев, 1984). К недостаткам данных моделей можно отнести прямую зависимость их точности и возможности целевого применения от объема и качества, а также непрерывности временного интервала доступности экспериментальных данных. Обеспечить в рамках проведения эксперимента соответствующих условий не представлялось воз-

можным, поэтому данные модели в качестве возможного варианта компенсации ионосферной погрешности не рассматривались.

Подход, связанный с коррекцией модели ионосферы по экспериментальным данным также применим и к эмпирическим моделям (Galkin, 2012). Преимуществом данного подхода является не только повышение точности расчета ионосферных параметров, но и возможность практического применения модели для расчета ионосферных задержек в случае отсутствия экспериментальных данных о текущем состоянии ионосферы. Именно поэтому при проведении эксперимента данное направление исследований в части компенсации ионосферной погрешности было выбрано в качестве основного.

В качестве базовой эмпирической модели была выбрана модель ионосферы ГЛОНАСС (ИКД ГЛОНАСС, 2016). В данной модели реализован механизм коррекции за счет использования двух параметров адаптации:

- $s_A$  — численный множитель максимальной концентрации электронов F2-слоя ионосферы;
- $s_{F_{10.7}}$  — скорректированное значение индекса солнечной активности.

Данные параметры могут быть определены по информации о текущем состоянии ионосферы.

На текущий момент в международной практике широкое применение получил метод радиозондирования ионосферы с использованием приемников ГНСС (Feltens, 1998; Schaer, 1999; Mannucci, 1998; Hernández-Pajares, 1999), основная суть которого заключается в применении в качестве данных о текущем состоянии ионосферы линейных комбинаций (ЛК) измерений псевдодальности на двух когерентных частотах. Сформированные ЛК помимо ионосферной составляющей содержат систематические погрешности, обусловленные аппаратными задержками в каналах формирования радиосигналов НКА и приемных трактах навигационного измерительного средства — дифференциальные кодовые задержки (ДКЗ). При этом для оценки величины ДКЗ применяется подход, построенный на принципе сопоставления ЛК и её расчётного аналога — совокупности модельной ионосферной поправки и ДКЗ (Schaer, 1999; Dach, 2015; Georgiadou, 1988; Wild, 1994).

На момент проведения эксперимента узлы локализации «Квазар-КВО» были оснащены приёмниками ГНСС, включенными в решения IGS – badg, svtl, zeck и временными приёмниками GTR-51 (kv\_1, kv\_2, kv\_3) на пунктах «Бадары», «Светлое» и «Зеленчукская» соответственно. Это позволило при проведении исследований использовать измерения данных приемников в качестве основной информации о текущем состоянии ионосферы.

Исходя из вышеизложенного, была разработана следующая методическая схема, включающая несколько этапов.

На первом этапе с использованием двухчастотных кодовых измерений псевдодальности, прошедших процедуру сглаживания фазовыми, формируются ЛК:

$$\Delta P = \tilde{P}_2 - \tilde{P}_1,$$

где  $\Delta P$  — значение ЛК псевдодальностей;

$\tilde{P}_1, \tilde{P}_2$  — кодовые измерения псевдодальностей на двух когерентных частотах НКА, прошедшие процедуру сглаживания фазовыми измерениями.

Применение процедуры сглаживания позволяет снизить случайную составляющую кодовых измерений до уровня единиц сантиметров.

На втором этапе осуществляется оценка ДКЗ. Для этого составляется и решается система нормальных уравнений с использованием формулы

$$\Delta P = 40.3 k F_1(z) E(\beta, s) + C,$$

Где  $k$  — частотный коэффициент, определяемый по формуле

$$k = (f_1^2 - f_2^2)/(f_1^2 f_2^2),$$

$f_1, f_2$  — значения когерентных частот радиосигналов НКА двух диапазонов;

$F_1(z)$  — модифицированная функция отображения, определяемая по формуле

$$F_1(z) = 1/\sqrt{1 - (\sin(\alpha z) R_e / (R_e + H_{\text{MSLM}}))^2},$$

$R_e = 6371$  км — средний радиус Земли;

$H_{\text{MSLM}} = 506.7$  км — высота ионосферного слоя над поверхностью Земли ([Dach, 2015](#); [Jin, 2012](#));

$\alpha = 0.9782$  — корректирующий коэффициент ([Dach, 2015](#); [Jin, 2012](#));

$z = (90^\circ - \gamma)$  — зенитный угол, соответствующий углу места  $\gamma$  проведения измерения;

$E(\beta, s)$  — функция распределения значений вертикального ПЭС, представляемая в виде разложения в ряд Тейлора

$$E(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\text{max}}} \sum_{m=0}^{m_{\text{max}}} E_{nm} (\beta - \bar{\beta})^n (s - \bar{s})^m,$$

$E_{nm}$  — неизвестные коэффициенты разложения в ряд Тейлора;

$n_{\text{max}}, m_{\text{max}}$  — максимальные степени разложения;

$\beta$  — геомагнитная широта подионосферной точки;

$s$  — связанная с Солнцем долгота подионосферной точки, определяемая с использованием выражения

$$s = T + L - 180^\circ,$$

где  $T$  — время проведения измерений в шкале UT;

$L$  — долгота подионосферной точки;

$\bar{\beta}, \bar{s}$  — координаты начальной точки;

$C$  — неизвестное значение ДКЗ.

Решение проводилось на суточных интервалах совместно для каждой пары приемников ГНСС пункта колокации с использованием ЛК, сформированных по измерениям в зависимости от типа использованных радионавигационных сигналов, приемника и НКА. При этом значения ДКЗ считались постоянными на суточном интервале, а неизвестные коэффициенты разложения в ряд Тейлора определялись для каждого часового подынтервала.

После оценки ДКЗ на следующем этапе формируются значения вертикального ПЭС, которые характеризуют текущее состояние ионосферы

$$N_e = (\Delta P - C)/(40.3 k F_1(z)).$$

На последнем этапе определяются параметры адаптации модели ГЛОНАСС путем минимизации отклонений модельных и полученных с использованием ЛК значений ПЭС:

$$\min_{F \in F^g} \sum_M |P^g(F^g) - \text{ТЕС}|,$$

где  $F^g$  — множество возможных оценок параметров модели ионосферы  $c_A$  и  $c_{F_{10.7}}$ ;

$M$  — количество значений ПЭС на интервале времени определения параметров модели;

$P^g(F^g)$  — модельные значения ПЭС с учетом параметров адаптации;

ТЕС — множество значений ПЭС  $N_e$ .

Параметры адаптации определялись отдельно для каждого приемника ГНСС-узлов колокации в двух вариантах: суточные и часовые. Последующее их применение при расчете ионосферных поправок показало, что наилучшим вариантом является использование часовых наборов. При этом для устранения скачков, возникающих при смене часовых наборов параметров адаптации, проводилось их осреднение на интервале проведения сеанса измерений приемником ГНСС по НКА. Остаточная погрешность данного подхода составила  $\sim 15\%$ .

### Учет тропосферной рефракции в эксперименте «Совмещение-2017»

Для расчета тропосферных задержек (ТЗ) использовались измерения, полученные со средств пунктов колокации «Бадарь», «Зеленчукская» и «Светлое» на интервале 05.05.2017–24.05.2017 с использованием нескольких технологий: БИС (SINEX) ([Система прецизионной навигации, 2014](#)), БИС (ZPD) ([Sung, 2009](#)), РСДБ ([Balidakis, 2017](#)), РВП ([Титов, 2015, С. 96](#)). Оценивание тропосферных задержек для пунктов колокации «Бадарь», «Зеленчукская», «Светлое» проводилось «перекрестным» сравнением по всем технологиям. Результаты статистического оценивания представлены в табл. 1.

Таблица 1

Обобщенные результаты сравнения ТЗ, уточненных по разным технологиям

Технология уточнения	Показатели точности технологии, см					
	«Бадарь»		«Зеленчукская»		«Светлое»	
	МО	СКО	МО	СКО	МО	СКО
БИС (ZPD) – БИС (SINEX)	0.03	0.49	0.02	0.41	0.04	0.21
РВП – БИС (SINEX)	0.12	0.35	0.04	0.47	-0.04	0.23
РСДБ – БИС (SINEX)	-0.11	0.37	-0.34	0.43	-0.16	0.55
РВП – БИС (ZPD)	0.10	0.53	0.06	0.50	-0.07	0.38
РСДБ – БИС (ZPD)	-0.34	0.79	-0.33	0.50	-0.21	0.61
РСДБ – РВП	-0.28	0.49	-0.07	0.46	-0.04	0.66

Анализ результатов статистического оценивания показал, что минимальная погрешность согласования тропосферных задержек с использованием разных технологий для всех трех пунктов обеспечивается по технологии «БИС (SINEX)». Графическое представление оценок тропосферных задержек, уточненных с использованием разных технологий, относительно технологии «БИС (SINEX)» для пунктов колокации «Бадарь», «Зеленчукская», «Светлое» представлены на рис. 12–14 соответственно.

Анализ полученных результатов показал следующее:

1. Погрешность тропосферных задержек по данным РСДБ в 1.5–2 раза больше в сравнении с остальными технологиями.

2. Погрешность данных РВП (с коррекцией на погрешность данных, используемых в качестве эталона) составляет 1 см, при этом неоднородность данных РВП составляет для пункта «Бадарь» 8.5 %, для пункта «Зеленчукская» — 31.3 %, а для пункта «Светлое» — 8 %.

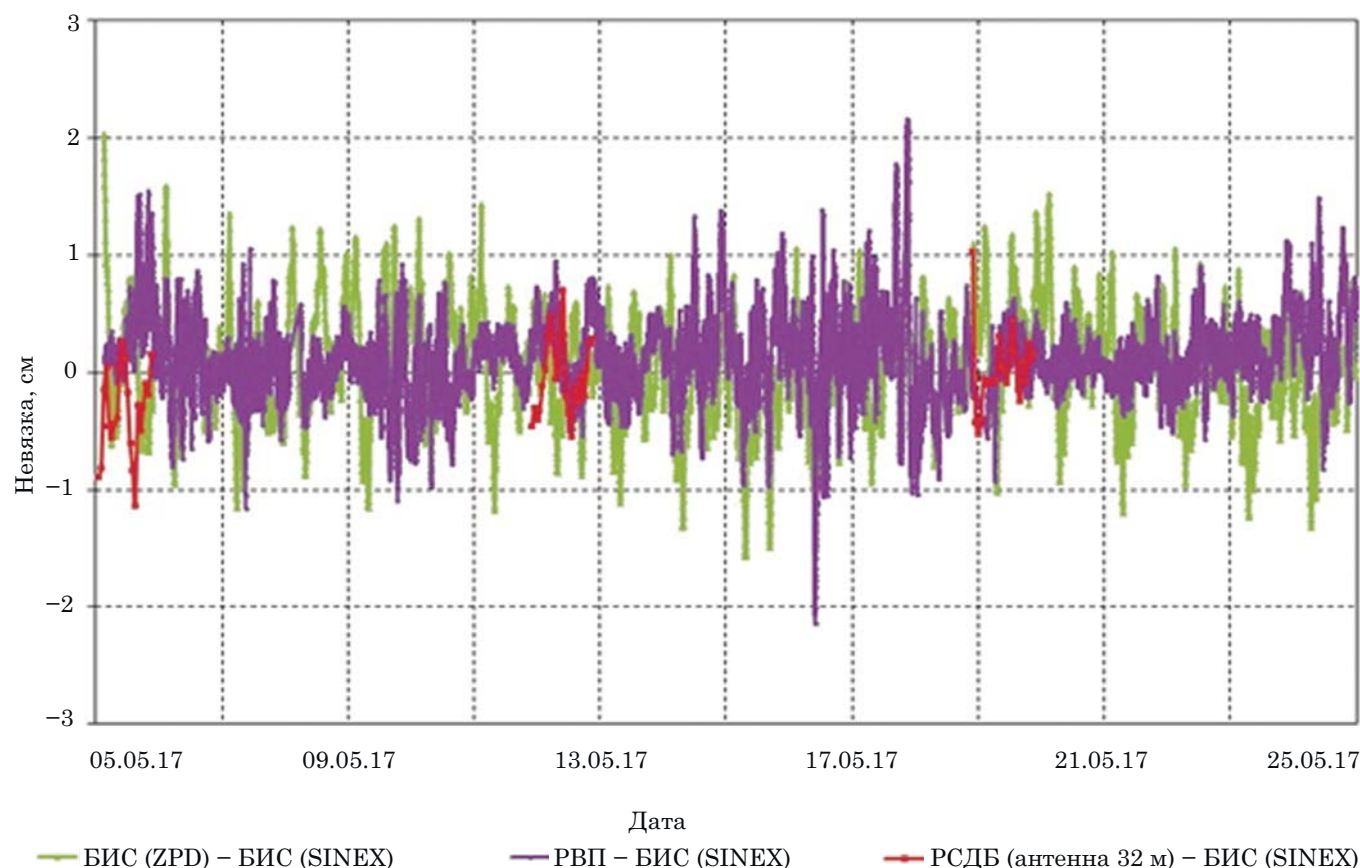


Рис. 12. Результаты сравнения оценок ТЗ для пункта колокации «Бадарь»

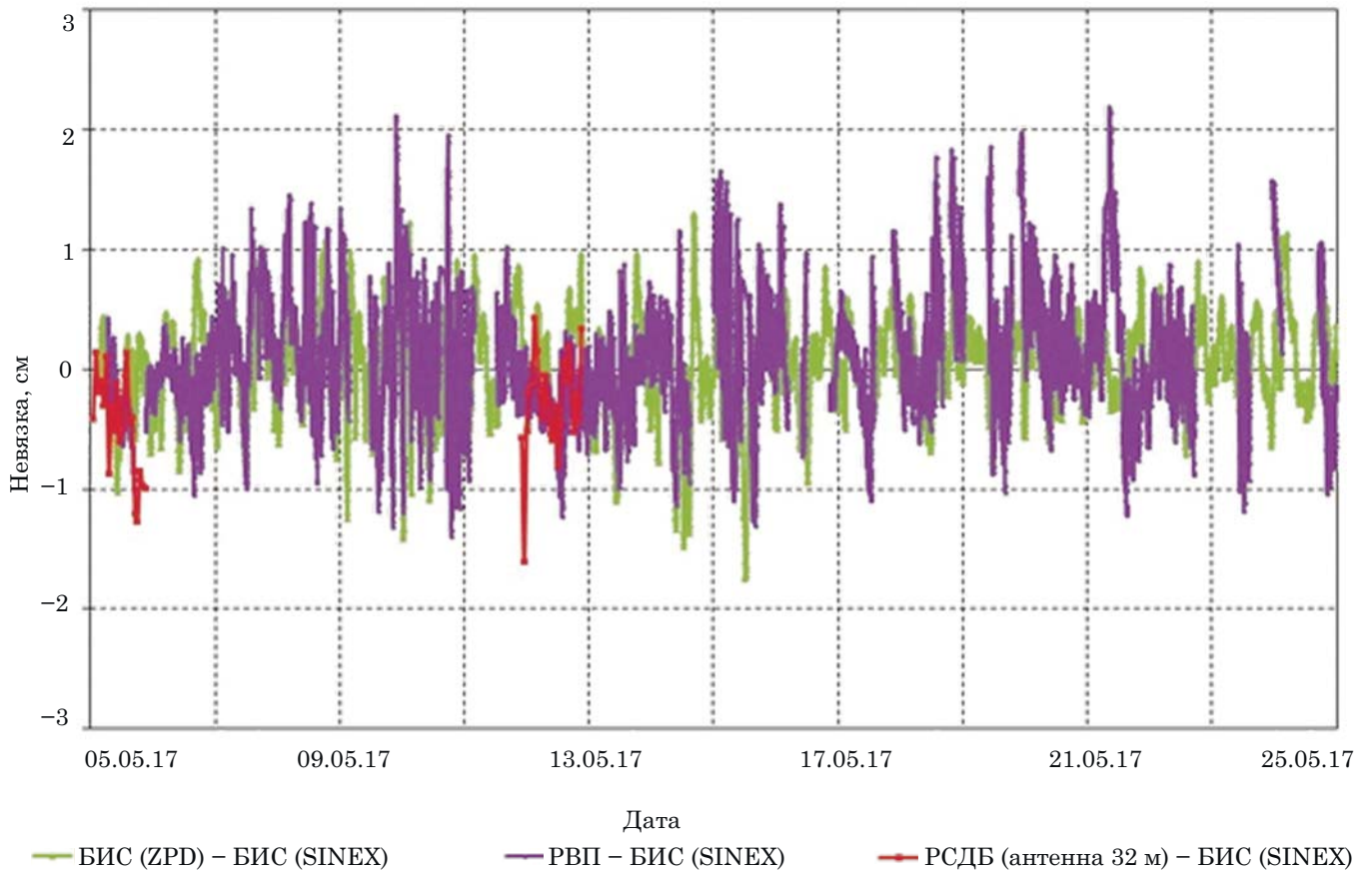


Рис. 13. Результаты сравнения оценок ТЗ для пункта колокации «Зеленчукская»

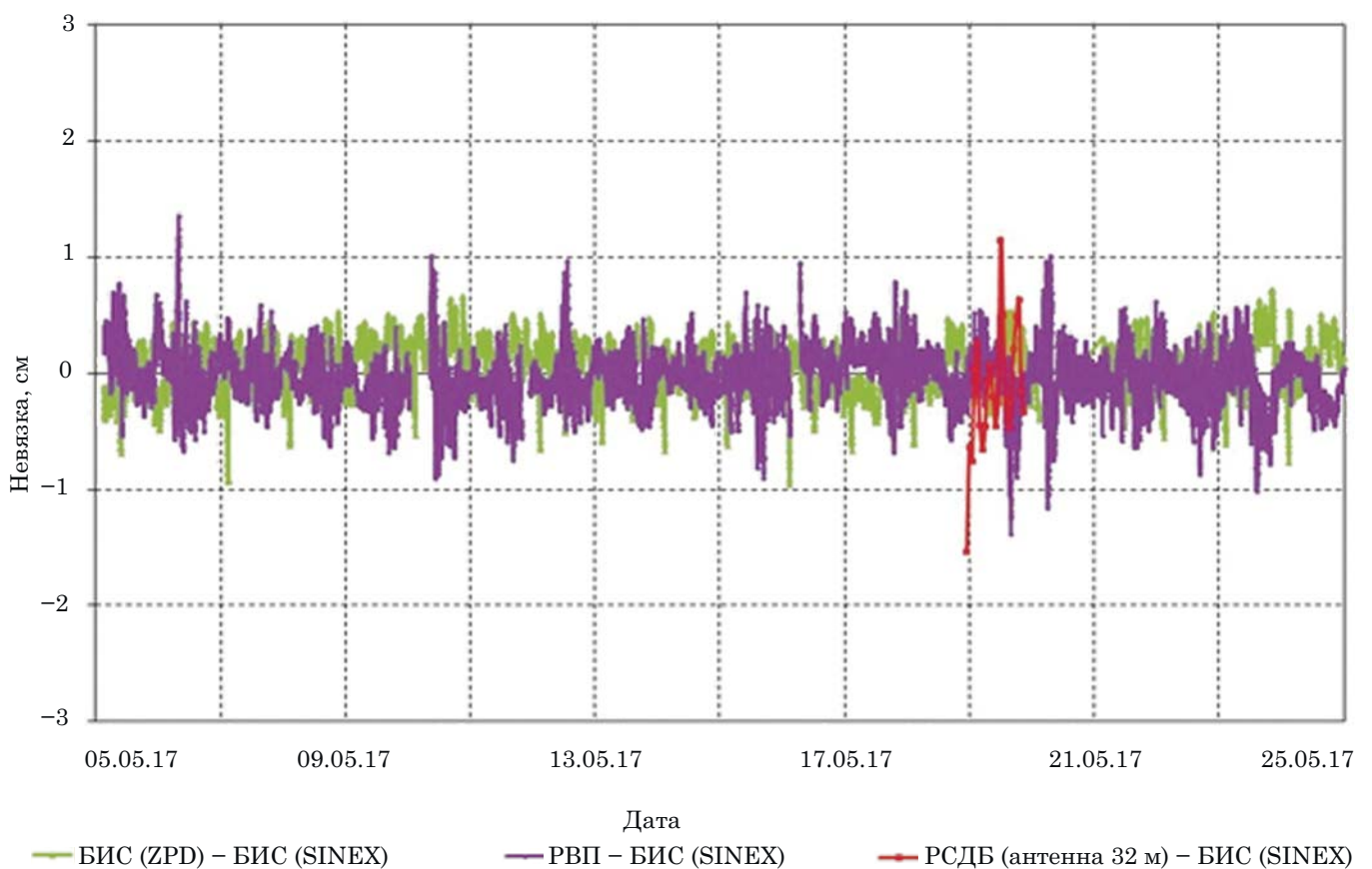


Рис. 14. Результаты сравнения оценок ТЗ для пункта колокации «Светлое»

Таким образом, отсутствие репрезентативной выборки измерений РСДБ не позволяет добиться нужного результата по точности тропосферных задержек в решении, что приводит к ухудшению решения. Прямая интеграция данных из одной технологии в другую может привести к ухудшению конечного результата, так как каждый из методов имеет свою специфику. Решение проблемы может быть найдено путем формирования комбинированного решения с использованием данных рассматриваемых технологий или использования данных РВП с предварительной фильтрацией аномальных данных и сглаженных по тропосферным задержкам, уточненным с использованием данных БИС (SINEX).

### Оценка параметров часов опорных стандартов частоты в эксперименте «Совмещение-2017»

Для анализа влияния характеристик частоты опорных стандартов на точность РСДБ-задержки проведено оценивание поправок к шкале времени (ШВ) навигационных приемников. Спецификация используемого оборудования представлена в табл. 2.

На первом этапе осуществлялся поиск скачков в оцениваемых временных рядах поправок к ШВ навигационных приемников. Для исключения влияния специфических свойств приемника поиск осуществлялся на множестве одномоментных скачков и для одного, и для другого приемника на одном пункте. Из рассмотрения также исключались интервалы времени, когда приемник с высокостабильной опоры переходил на внутренний генератор, что проявляется в виде скачкообразного изменения относительной погрешности меры частоты.

Результаты анализа скачков ШВ приемников (интервал «время начала — время конца», внутри которого произошел скачок опорной ШВ, и наблюдаются переходные процессы, связанные с восстановлением работоспособности навигационных приемников) представлены в табл. 3.

Выявленные скачки некоторым образом затрудняют совместную обработку выборки разнотипных измерений и применение рассматриваемой технологии. В процессе дальнейших исследований планируется разработка алгоритмов эффективного поиска и парирования возможных скачков ШВ для исключения их влияния на результаты колокации различных техник.

На втором этапе оценивалось влияние нестабильности опорных стандартов частоты на погрешность рассчитываемых РСДБ-задержек.

Для этого на интервалах непрерывности ШВ выполнялся расчет поправок к ШВ приемников по ГНСС-технике многоорбитального решения на основе совместной обработки измерений глобальной сети измерительных пунктов по фазе кода псевдослучайной погрешности (кодовые измерения) и фазе несущей частоты навигационного сигнала (фазовые измерения). Во втором варианте расчет поправок к ШВ осуществлялся по технике высокоточного позиционирования (Precise Point Positioning) с использованием апостериорной эфемеридно-временной информации различных центров анализа.

При сравнении PPP-решений по информации различных центров установлено, что шумовая характеристика временного ряда поправок остается неизменной при незначительном изменении систематической составляющей, что обусловлено

Таблица 2

Спецификация оборудования

Параметр	«Бадарь»		«Зеленчукская»		«Светлое»	
MARKER NAME	KV_1	BADG	KV_2	ZECK	KV_3	SVTL
PGM	GTR51	teqc	GTR51	teqc	GTR51	teqc
MARKER NUMBER	12359M009	12338M002	12359M005	12351M001	123459M013	12350M001
REC #	1309021	00181	1404005	00180	1510235	00179
TYPE	JAVAD TRE_G3T	JAVAD TRE_G3TH	JAVAD TRE_G3T	JAVAD TRE_G3TH	JAVAD TRE_G3T	JAVAD TRE_G3TH
VERS	1.2.0	DELTA3.2.7	1.2.0	DELTA3.2.7	1.2.2	DELTA3.2.7
ANT #	NEG13230010	00328	NEG14100004	00314	NEG15300011	383-0424
TYPE	NOV703GGG.R2	JAVRINGANT_DM	NOV703GGG.R2	JAVRINGANT_DM	NOV703	TPSCR.G3

Анализ скачков ШВ

«Бадары»		«Зеленчукская»		«Светлое»	
KV_1	BADG	KV_2	ZECK	KV_3	SVTL
06.05.2017 03:15– 06.05.2017 10:04	–	скачки не обнаружены	скачки не обнаружены	–	–
07.05.2017 20:34– 07.05.2017 23:40	07.05.2017 22:45– 07.05.2017 22:55			–	–
09.05.2017 22:32– 10.05.2017 01:12	–			–	–
–	–			10.05.2017 12:58– 10.05.2017 14:06	10.05.2017 12:58– 10.05.2017 13:03
18.05.2017 22:42– 18.05.2017 22:45	18.05.2017 22:42– 18.05.2017 22:45			–	–

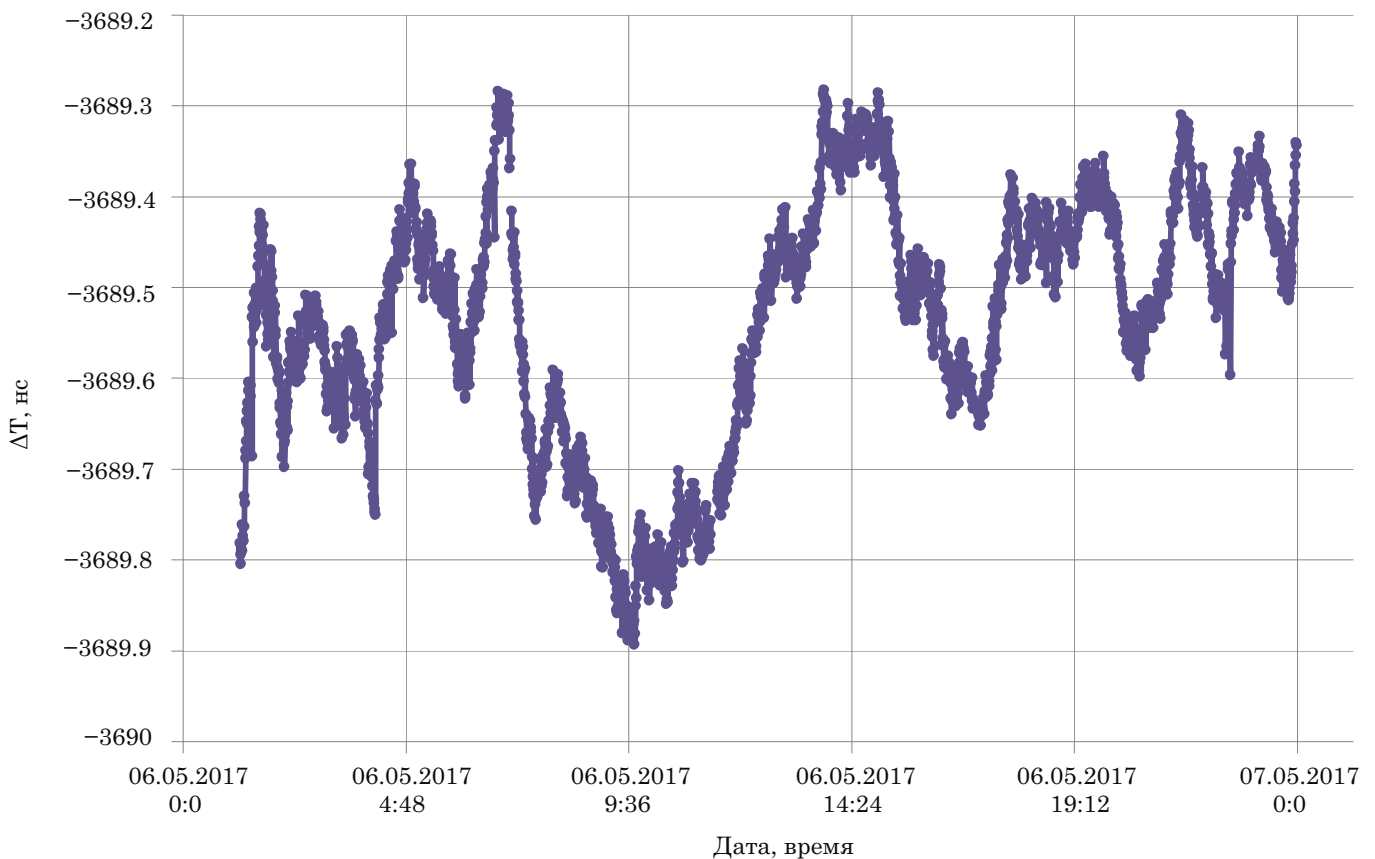


Рис. 15. Результаты сравнения ШВ приемников пункта колокации «Светлое»

индивидуальными характеристиками эфемеридно-временной информации с привязкой к конкретному центру анализа. Но на результатах анализа влияния нестабильности опорного генератора на точность получаемых РСДБ-оценок указанное обстоятельство не сказывается. Пример разности двух рядов на интервале эксперимента для пункта «Светлое» представлен на рис. 15.

Шум разности поправок к ШВ двух приемников, использующих частоту одного опорного генератора, оценивается величиной  $\sim 0.14$  нс (СКО) или  $\sim 0.10$  (СКО) для шума одного опорного ряда, что соответствует суточной нестабильности частоты опорного генератора на уровне  $1 \cdot 10^{-15}$ . Следует обратить внимание, что приемники по-разному используют шкалу опорного генератора,

и в разности двух поправок наблюдается ненулевая величина среднего, но для решаемой задачи эксперимента это обстоятельство не существенно.

Для однобазового интерферометра вклад нестабильности частоты опорного генератора войдет в оцениваемую величину задержки с множителем  $\sqrt{2}$ , соответственно вклад погрешности стандартов РСДБ-пунктов в погрешность РСДБ-задержки существенный.

При наличии скачков в ШВ опорных генераторов совместно с погрешностью оцифровки (РТ-32 — 50 нс, РТ-13 — до 4 нс) существенно усложняет процесс параметризации. Для совместной обработки часовых сессий по КА на 3–8-суточных интервалах необходимо а) уточнять для каждого сеанса, так как отсутствует информация о смене частоты и скачках ШВ между сеансами, что существенно понижает информативность выборки.

В 2021 г. завершены государственные испытания лазерной системы комплекса средств фундаментального обеспечения (ЛС КСФО), разработанной АО «НПК «СПП» в ОКР «Точка».

Результаты испытаний беззапросного канала измерения дальности позволяют судить, что точность измерения расхождения бортовой шкалы времени КА и шкалы времени измерительного пункта находится на уровне 20 пс. Полученный результат создает задел на будущее для существенного повышения точности определения РСДБ-задержки с включением в объединенную выборку измерений ЛС КСФО.

Полученные результаты эксперимента позволяют сформировать направления дальнейших исследований и сформулировать необходимые рекомендации, среди которых дальнейшее повышение точности опорных генераторов пунктов до уровня  $5 \cdot 10^{-16}$  (по суточной нестабильности  $\sigma$ ), обеспечение непрерывности формируемых шкал времени путем исключения любых причин их возникновения, повышение точности оцифровки РСДБ-измерений и включение в выборку комплексированных измерений колоцируемых средств измерений ЛС КСФО.

### Математические модели и алгоритмы в интересах совмещения СК

Остановимся более подробно на проблеме совмещения СК, в которых проводятся измерения различными техниками.

Как известно, апостериорные эфемериды ГЛОНАСС приведены в ITRF-2014 (International Terrestrial Reference Frame), полученной по станциям ГНСС, а собственные координаты станций КОС и РСДБ заданы также в ITRF-2014, но получены внутри каждой техники отдельно. В результате объективно существует различие между определениями этих СК. Иными словами, оценки углов взаимной ориентации этих СК недостаточны

для их совмещения СК, поскольку существуют различия масштабного коэффициента каждой из перечисленных СК, а также различие в определении их начала (смещение нуля). Таким образом, совмещение СК «А» и «Б» друг с другом требует оценки всех параметров преобразования Гельмерта: три компоненты смещения начала СК  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ , ориентация одной СК относительно другой (три компоненты  $\omega_X, \omega_Y, \omega_Z$ ), и масштабный коэффициент  $m$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_B = (1+m) \begin{pmatrix} 1 & +\omega_Z & -\omega_Y \\ -\omega_Z & 1 & +\omega_X \\ +\omega_Y & -\omega_X & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_A + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Так как оценка параметров преобразования для совмещения всех систем координат, которые используются каждой из обсуждаемых техник (РСДБ, КОС, ГНСС и ДОРИС) представляет собой отдельно взятую сложную научно-техническую проблему в силу наличия сопутствующих случайных факторов и неопределенностей, рассмотрим для начала задачу разработки алгоритмов и их экспериментальной отработки применительно к проблеме техник КОС и ГНСС. Выбор КОС в качестве первого эксперимента обусловлен подготовленностью к такому эксперименту НКА ГЛОНАСС в силу их оснащенности соответствующим оборудованием.

Для оценки параметров преобразования (5) используются запросные измерения «НКА — наземная станция» и измерения КОС, модель геометрической задержки которых имеет следующий вид

$$D_k^i = \rho_k^i + \delta S_T + \delta S_{k,П} + \delta S_{ЦМ}^i + \delta S_{k,РЕЛ}^i, \quad (6)$$

где  $\rho_k^i$  — геометрическая дальность,

$\delta S_T$  — поправка на рефракцию сигнала в тропосфере,

$\delta S_{k,П}$  — поправка на задержку в тракте приемника,

$\delta S_{ЦМ}^i$  — поправка к дальности за счет выноса ОРАС относительно центра масс КА,

$\delta S_{k,РЕЛ}^i$  — релятивистская поправка.

Обработка измерений проводилась с использованием метода наименьших квадратов.

При совместной обработке ГНСС и КОС измерений определение матрицы наблюдаемости требует вычисления матрицы наблюдаемости, состоящей из частных производных координат СК ГНСС по компонентам преобразования матрицы Гельмерта

$$\begin{aligned} \frac{\partial X_B}{\partial m} &= X_A + \omega_Z Y_A - \omega_Y Z_A, & \frac{\partial X_B}{\partial \omega_X} &= 0, & \frac{\partial X_B}{\partial \omega_Y} &= -(1-m)Z_A, \\ \frac{\partial X_B}{\partial \omega_Z} &= (1-m)Y_A, & \frac{\partial X_B}{\partial \Delta X} &= 1, & \frac{\partial X_B}{\partial \Delta Y} &= 0, & \frac{\partial X_B}{\partial \Delta Z} &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$



$$\frac{\partial Y_B}{\partial m} = -\omega_z X_A + Y_A - \omega_x Z_A, \quad \frac{\partial Y_B}{\partial \omega_x} = (1-m)Z_A, \quad \frac{\partial Y_B}{\partial \omega_y} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial X_B}{\partial \omega_z} = -(1-m)X_A, \quad \frac{\partial Y_B}{\partial \Delta X} = 0, \quad \frac{\partial Y_B}{\partial \Delta Y} = 1, \quad \frac{\partial Y_B}{\partial \Delta Z} = 0,$$

$$\frac{\partial Z_B}{\partial m} = \omega_y X_A - \omega_x Y_A + Z_A, \quad \frac{\partial Z_B}{\partial \omega_x} = -(1-m)Y_A, \quad (9)$$

$$\frac{\partial Z_B}{\partial \omega_y} = (1-m)X_A, \quad \frac{\partial Z_B}{\partial \omega_z} = 0, \quad \frac{\partial Z_B}{\partial \Delta X} = 0, \quad \frac{\partial Z_B}{\partial \Delta Y} = 0, \quad \frac{\partial Z_B}{\partial \Delta Z} = 1.$$

Из соотношений следует, что измерения включают широкий спектр случайных ошибок, большинство из которых поддается оценке существующими методиками и средствами. Тем не менее, в эксперименте по совместной обработке измерений остаются априори неизвестными параметры выноса отражающих панелей КОС НКА (ОРАС) относительно центра масс КА. В связи со сказанным, помимо представленных выше в соотношении (5) параметров преобразования, в оцениваемый вектор состояния входят параметры выноса  $X_{св}$ ,  $Y_{св}$ ,  $Z_{св}$  в связанной с КА СК для каждого объекта системы «НКА-станция КОС».

В связи тем что КА системы ГЛОНАСС ориентированы на Солнце, величина поправки к дальности КОС за счет выноса ОРАС относительно центра масс рассчитывается по формуле, получаемой из условия ориентации ОРАС на Землю и ориентации КА на Солнце:

$$\Delta D_{\text{ОРАС}} = \|\lambda_{ij}\|^T \cdot \vec{r}_{\text{АС}},$$

где  $\|\lambda_{ij}\| = \frac{1}{|\vec{r}_{\text{АС}}|} \begin{vmatrix} x_m/|\vec{r}_{\text{КА}}| \\ d_m/|\vec{D}| \\ c_m/|\vec{C}| \end{vmatrix}$  — матрица перехода от

связанной системы координат КА к геоцентрической с учетом ориентации КА на Солнце,

$\vec{r}_{\text{АС}}$  — вектор центра ОРАС в связанной системе координат КА,

$\vec{r}_{\text{КА}}$  — геоцентрический радиус КА,

$\vec{r}_{\odot}$  — геоцентрический радиус Солнца,

$$x_m = (\vec{r}_{\text{КА}} \cdot \vec{r}_{\text{АС}}),$$

$$d_m = (\vec{D} \cdot \vec{r}_{\text{АС}}),$$

$$c_m = (\vec{C} \cdot \vec{r}_{\text{АС}}).$$

$[\times], [\cdot]$  — операторы векторного и скалярного произведения векторов соответственно.

Соотношения для расчета частных производных

$$\frac{\partial \vec{r}}{\partial \vec{r}_{\text{СВ}}} = \begin{vmatrix} \frac{x}{r} & \frac{y}{r} & \frac{z}{r} \\ \frac{dx}{d} & \frac{dy}{d} & \frac{dz}{d} \\ \frac{cx}{c} & \frac{cy}{c} & \frac{cz}{c} \end{vmatrix}, \quad (10)$$

где  $x, y, z$  — компоненты радиус-вектора  $\vec{r}$  КА в абсолютной геоцентрической экваториальной СК (АСК);

$c_x, c_y, c_z$  — компоненты вектора  $\vec{C}$ , перпендикулярного плоскости, образуемой радиус-вектором КА ( $\vec{r}_{\text{КА}}$ ) и вектором направления на Солнце ( $\vec{r}_{\odot}$ ) в АСК;

$d_x, d_y, d_z$  — компоненты вектора  $\vec{D}$ , перпендикулярного плоскости, образуемой вектором направления ( $\vec{C}$ ) и радиус-вектором КА ( $\vec{r}$ ) в АСК.

### Результаты совмещения координат, формируемых техниками ГНСС и КОС

Результаты эксперимента по совмещению координат, формируемых техниками ГНСС и КОС, подробно изложены в работе [Пасынкова, 2019, С. 108](#), где показано, что при решении задачи совмещения необходимо для КА системы ГЛОНАСС уточнять индивидуальные выносы ОРАС относительно центра масс КА, а результаты совмещения в части значения линейных смещений и разворотов (параметров Гельмерта) не зависят от выбора апостериорных эфемерид того или иного центра анализа, а вот масштабный коэффициент, наоборот, существенно варьируется.

Техника КОС в отношении масштабного коэффициента достаточна для формирования выводов в отношении точности апостериорных эфемерид.

Наблюдаемый относительный разворот СК, формируемых техниками ГНСС и КОС, невозможно соотнести ни с одной, ни с другой техникой, так как они не несут информации об ориентации СК, и единственный инструмент, с помощью которого можно получить необходимые данные, — это техника РСДБ.

### Результаты совмещения координат, формируемых техниками ГНСС и РСДБ

При обработке РСДБ-задержек по сигналам ГЛОНАСС впервые предложена технология комплексирования РСДБ-задержек по внегалактическим радиосточникам, РСДБ-задержек по навигационным сигналам ГЛОНАСС и измерений наземного сегмента космического комплекса системы ГЛОНАСС.

С 6 по 23 мая 2017 г. проведены две серии сеансов (126–131 сутки — 47 сеансов и 135–143 сутки — 45 сеансов) по шести КА системы ГЛОНАСС (R02, R07, R09, R11, R17, R21), информация о которых представлена в табл. 4 и 5. Выбор по два КА из каждой плоскости осуществлялся из условия наиболее активного (приоритетного) сопровождения в международной службе лазерной дальнометрии.

РСДБ-сеансы по КА проводились радиотелескопами на пунктах «Бадарь», «Зеленчукская» и «Светлое». Не все сеансы прошли корреляционную обработку, и они помечены в таблице символом «—».

Таблица 4

Таблица 5

Сеансы РТ-32 по КА ГЛОНАСС с 126 по 131 сутки  
2017 г. (первая фаза эксперимента)Сеансы РТ-32 по КА ГЛОНАСС с 135 по 143 сутки  
2017 г. (вторая фаза эксперимента)

Сеанс	R02	R07	R09	R11	R18	R21
126-1939		+++				
126-2042		+++				
126-2152			+++			
126-2330					-+-	
127-0222	++					
127-0739		+++				
127-0910			+++			
127-1050					+++	
127-1152			+++			
127-1235				+++		
127-1340						+++
127-1630		+++				
127-2149	+++					
127-2243					+++	
127-2352				-++		
128-0042	--+					
128-1529		+++				
128-1710		+++				
128-2019					+++	
128-2133	-+-					
128-2222					-+-	
129-0430		+++				
129-0532		+++				
129-0620					+++	
129-0720			+++			
129-0754					+++	
129-0920				+++		
129-1003						+++
129-1119						+++
129-1222						+++
129-1419		+++				
129-1522		+++				
129-1739	+ - +					
129-2030	--+					
129-2142					+++	
129-2319						+++
130-0300		+++				
130-1620	+ --					
130-2149						+ --
130-2252						---
131-0109		+ --				
131-0203			---			
131-0321		---				
131-0417			---			
131-1509			+ --			

Сеанс	R02	R07	R09	R11	R18	R21
135-1403				+ --		
135-1443						+ --
135-1600		+ --				
135-2120					+ --	
135-2223				+ --		
135-2303	+ --					
135-2343				---		
136-1419						+ --
136-1513		+ --				
136-1639		---				
136-1959					+ --	
136-2102	+ --					
136-2153				+ --		
137-1450		+++				
137-1710	+++					
137-2030	+++					
137-2113					--+	
137-2250						+++*)
138-0219		+++				
138-1549	+++					
140-2019						+++
140-2230			+++			
141-0009			+++			
141-0113				+++		
141-0212	--+					
141-0313				+ - +		
141-0342				+++		
141-0452						+++
141-1039					--+	
141-1139			+++			
141-1252	+++					
141-1439				+++		
141-2039		+++				
141-2133			+++			
141-2232			+++			
141-2339				+++		
142-0302	+++					
142-1600						+++
142-1703		+++				
142-1802						+++
142-2253					+++	
143-0000	+++					
143-0103	+++					

*Примечание.* В таблице принято трехсимвольное обозначение, где первый символ принадлежит базе «Бадарь» — «Зеленчукская» (bdzc), вторая позиция базе — «Бадарь» — «Светлое» (bdsv), а третья позиция — базе «Зеленчукская» — «Светлое» (zcsv). Знак «+» в позиции означает наличие измерений, знак «-» — их отсутствие, а знак «\*») — признак асинхронности измерений на трёх базах.

При интерпретации РСДБ-задержки внесены следующие поправки:

- поправка на вынос антенны БИНС относительно центра масс КА;
- тропосферная поправка по апостериорным данным и методике, описанной выше;
- ионосферная поправка по гибридной модели и методике, описанной выше со знаком минус, так как для оценок использовалась фазовая задержка;
- поправка, учитывающая температурную деформацию антенны РТ-32;
- поправки на смещение опорных часов станции, рассчитанные по ГНСС-технике.

Эффект поляризации фазы, присущий работе на ГНСС-антенне, при работе остронаправленной антенны не проявляется.

Наибольшую погрешность, как и следовало ожидать, приносит ионосферная поправка, так как измерения РТ-32 по КА ГЛОНАСС проводились в одночастотном режиме, и именно от корректности её расчёта зависит точность финальной интерпретации РСДБ-задержки по КА ГЛОНАСС.

При модернизации РТ-13 для работы по сигналам ГЛОНАСС следует обеспечить работу по двум частотам для компенсации ионосферной погрешности классическим двухчастотным методом.

Координаты антенн РТ-32 соответствовали ITRF-2014 с учётом скоростей и динамических вариаций координат (приливов в твердом теле Земли, океанической и атмосферной нагрузок и поллярного прилива).

В качестве апостериорных эфемерид и часов использованы данные тех же центров анализа (pmk, cod, iac, esa), что и при обработке лазерных дальномерных измерений.

Приведём графики отклонений интерпретированной РСДБ-задержки для КА «Глонасс-К» (R09) для нормальных точек с интервалом осреднения 30 с (рис. 16–18), как наиболее характерных. Использована апостериорная эфемеридно-временная информация центра анализа pmk. Отметим, что среднее в первых двух сеансах не равно нулю и является следствием согласования часов между тремя станциями из-за расхождений, обусловленных литерными задержками в наземной аппаратуре трёх станций. Уровень относительной литерной задержки находится на уровне 1.5 см, что говорит об удовлетворительной относительной калибровке станций между собой.

Однако при модернизации, с учётом потенциальной точности новой навигационной функции, калибровка в линейной мере должна быть обеспечена на уровне 2–3 мм.

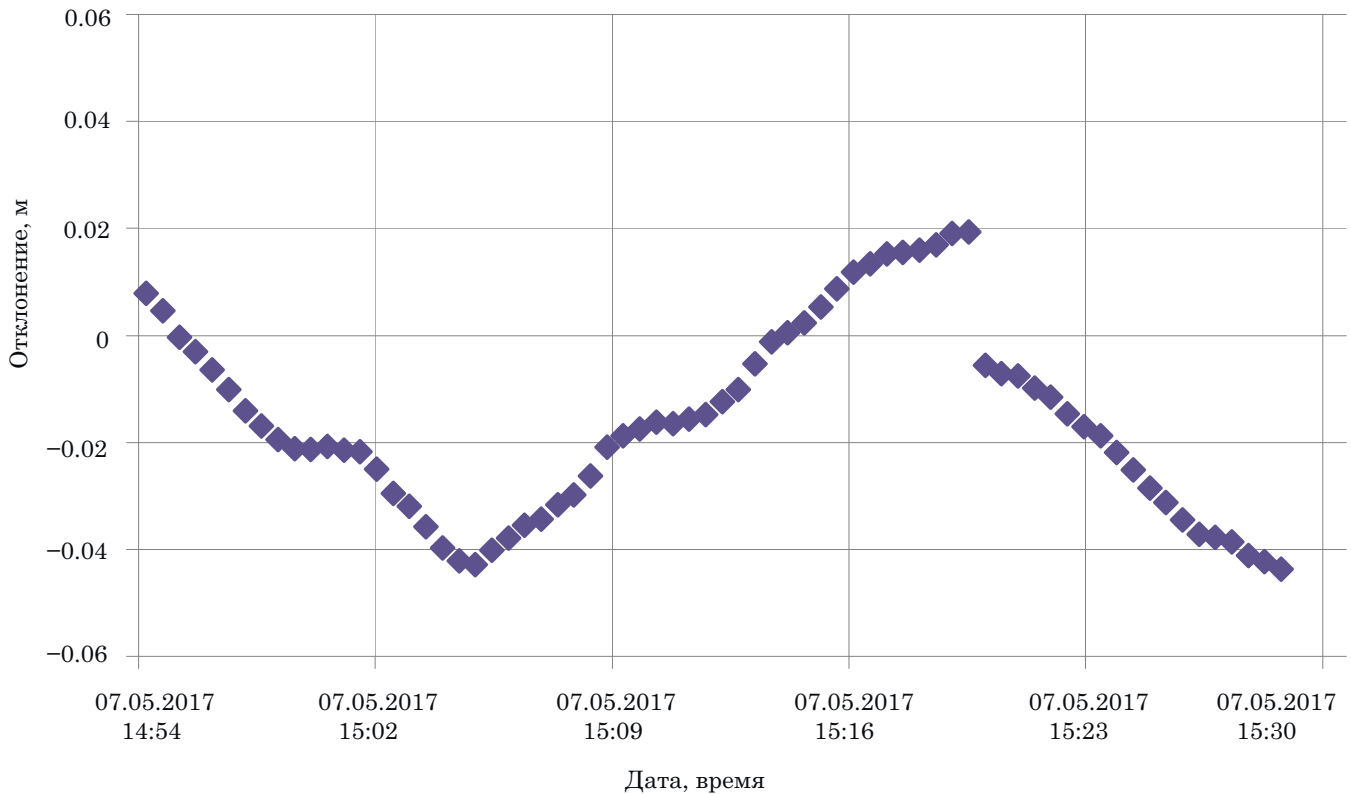


Рис. 16. Оценка измерений сеанса 127-1152 (R09) для базы «Бадарь» — «Зеленчукская», оцифровка шкалы времени — московское время (МВ)

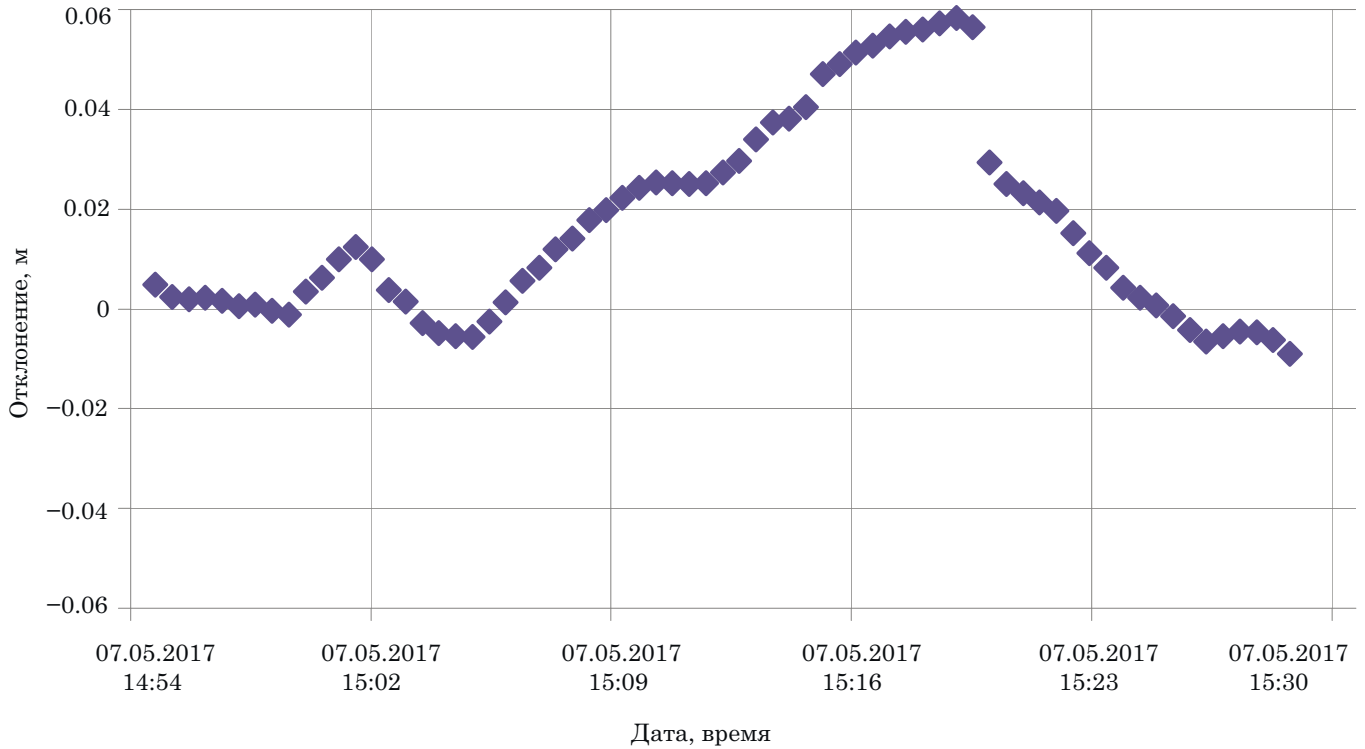


Рис. 17. Оценка измерений сеанса 127-1152 (R09) для базы «Зеленчукская» — «Светлое»

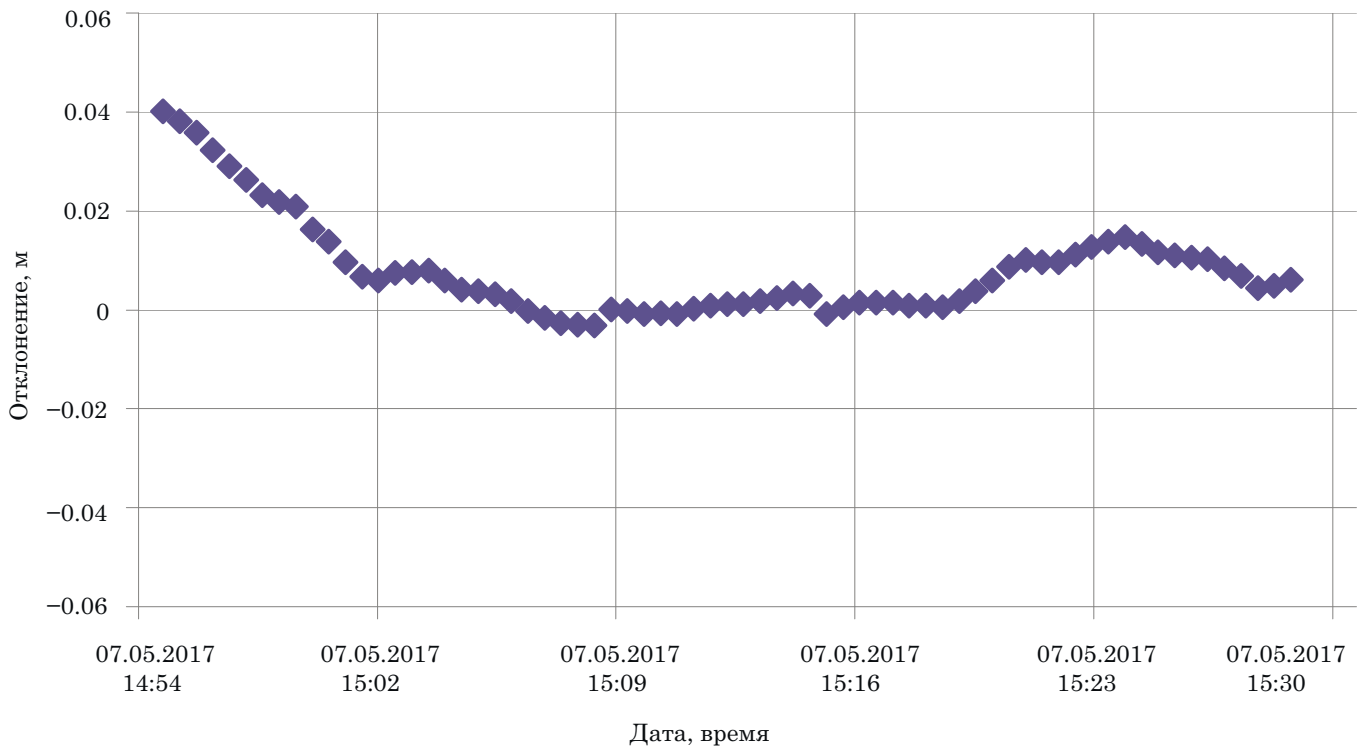


Рис. 18. Оценка измерений сеанса 127-1152 (R09) для базы «Бадарь» — «Светлое»

Выбор той или иной базовой (или опорной) станции для уточнения относительных часов (в данном случае аппроксимация линейным трендом) значения не имеет.

Измерения сеанса проведены на высоких углах места: «Бадарь» — начало зоны —  $47^\circ$ , конец

зоны —  $31^\circ$ ; «Светлое» — начало зоны —  $44^\circ$ , конец зоны —  $25^\circ$ ; «Зеленчукская» — начало зоны —  $61^\circ$ , конец зоны —  $44^\circ$ , поэтому влияние тропосферной рефракции (с учётом выбранной методики) минимальное.

Для баз «Бадарь» — «Зеленчукская» и «Зеленчукская» — «Светлое» в районе 15:20 МВ (12:20 UTC) наблюдается скачок порядка 2.5 см, чего нет в измерениях базы «Бадарь» — «Светлое». Физическая природа скачка на подобную величину не ясна, так как ни тропосферная, ни ионосферная сетки на границе временной метки 12:20:28 и метки 12:20:29 не изменялись, функция эфемерид и прочие также в данной точке гладкие. На данном интервале опорные шкалы также были стабильны (коррекция шкалы времени у станции «Бадарь» 07.05.2021 на интервале 19:45–19:55 UTC). Наиболее вероятно (если исключить какие-то скачкообразные вариации в антенной системе РТ-32), что данный скачок является погрешностью корреляционной обработки.

Если для базы «Бадарь» — «Светлое» СКО измерений относительно тренда около 9 мм, то в двух других вариантах (со скачком) — 1.8 см, то есть в два раза больше.

Тем не менее, средний уровень СКО измерений в сравнении с первыми разностями фазовых измерений, сформированных по ГНСС-технике в тех же условиях, примерно на 30 % меньше, что позволяет рассматривать навигационную функцию РСДБ-задержки, как перспективную для ЭВО системы ГЛОНАСС, с характеристиками, превосходящими по точности фазовые измерения ГНСС-приёмников.

К сожалению, скачки в фазовой неоднозначности, присущие ГНСС-измерениям, также проявляются и в оценках РСДБ-задержки.

Приведём графики отклонений РСДБ-задержки по КА «Глонавс-М» (R21) со скачком в виде исходного ряда (рис. 19) и скорректированного (рис. 20).

Оцифровка измерений РТ-32 относительно опорной шкалы времени является относительно грубой и достигает 50 нс (подтверждается работой по внегалактическим радиоисточникам), что не позволяет обрабатывать сеансы с одним линейным трендом и приводит к необходимости линейного члена тренда ( $a_0$ ) для каждого сеанса уточнять в отдельности.

Сравнительный анализ оцифровки измерений для «классической» РСДБ-задержки при работе по внегалактическим радиоисточникам для РТ-32 (четыре часовых сессии в сутки) и новых антенн РТ-13 (4–5 часовых сессий в сутки) показал, что для нового комплекса (РТ-13) задача оцифровки измерений от сеанса к сеансу решена существенно лучше и не превышает 4 нс. Тем не менее, даже для РТ-13 погрешность оцифровки является значимой величиной для совместной обработки (более одного сеанса) РСДБ-задержки. С учётом полученных оценок точности новой навигационной функции, погрешность оцифровки измерений в линейной мере не должна превышать 2–3 мм

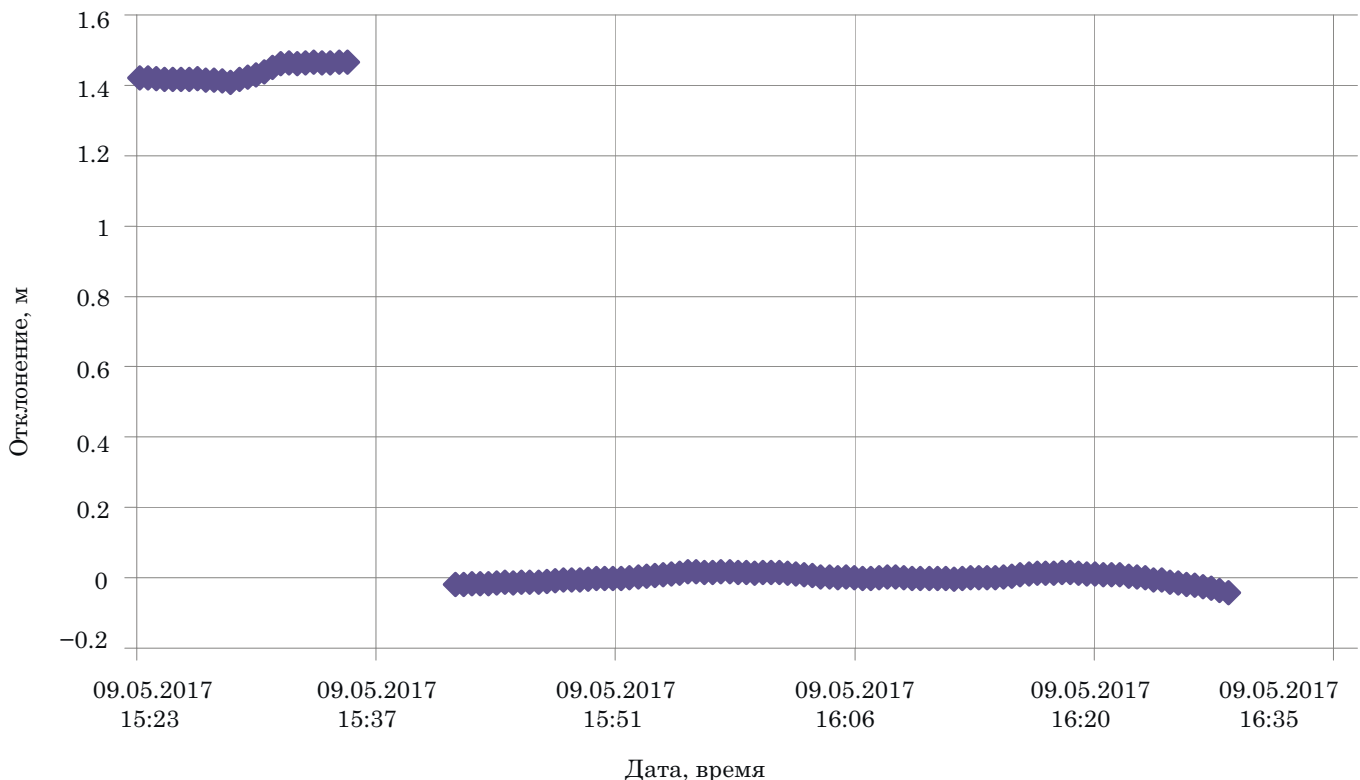


Рис. 19. Оценка измерений исходного сеанса 129-1222 (R21) для базы «Бадарь» — «Светлое»

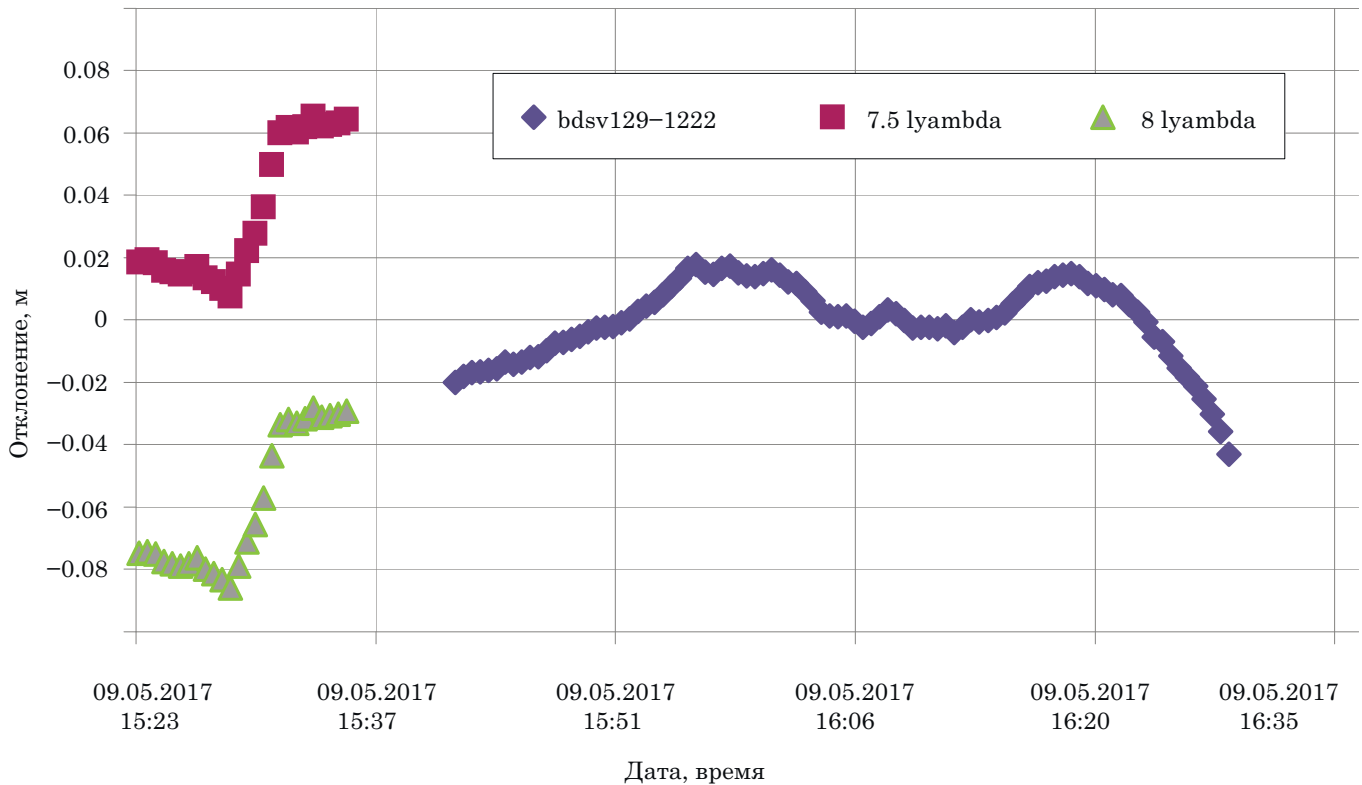


Рис. 20. Оценка измерений скорректированного на 7.5 и 8.0 длин волн фазы несущей сеанса 129-1222 (R21) для базы «Бадарь» — «Светлое»

или 10 пс, что можно рассматривать как требование при модернизации РТ-13 для работы по КА системы ГЛОНАСС.

Наличие коррекций часов на интервале обработки и изменение дрейфа после коррекции часов приводит к необходимости уточнения на всём интервале обработки также полиномиального члена тренда ( $a_1$ ), что понижает информативность выборки.

При модернизации РТ-13 для работы по КА системы ГЛОНАСС следует избегать корректировок часов, как, например, это принято в ГНСС-технике.

Перед расчётом параметров Гельмерта проведена посеансная оценка измерений на трёх базах с отбраковкой аномальных измерений. В процессе решения задачи на данном этапе установлены границы допусков, которые составили 4.7 см для отбраковки аномальных результатов измерений. Граница допусков выбрана эмпирически и примерно соответствует предельной погрешности достигнутого уровня интерпретации измерений РСДБ (по КА ГЛОНАСС в одночастотном режиме) и погрешности апостериорных эфемерид. При данном допуске процент аномальных измерений составляет 3–5 %.

Затем по каждому КА в отдельности по совокупности полученных измерений на трёх базах (при фактической реализации сеансов измерений)

была проанализирована возможность решения задачи определения орбит и расчёта эфемерид с использованием измерений РТ-32 (4 сеанса в сутки) для расчёта всемирного времени на двух интервалах 126–131 сутки (интервал 6 суток) и 135–143 (9 суток). То есть потенциально могло быть получено по две реализации результатов расчёта эфемерид.

Для региональной схемы на трёх базах для расчёта орбит требуется замыкание трассы, то есть не менее 8 суток.

В результате анализа на первом интервале получены:

- R02 — 7 сеансов (4 сеанса с неполным числом баз), 4 суток (127–130);
- R07 — 12 сеансов (1 сеанс с неполным числом баз), 6 суток (126–131);
- R09 — 9 сеансов (1 сеанс с неполным числом баз и 2 сеанса не прошли корреляционную обработку), 6 суток интервал с отсутствием измерений в 128 и 130 сутки (126–131);
- R11 — 3 сеанса (1 сеанс с неполным числом баз), 3 суток (127–129) с отсутствием измерений в 128 сутки;
- R18 — 8 сеансов (2 сеанса с неполным числом баз), 4 суток (126–129);
- R21 — 7 сеансов (1 сеанс с неполным числом баз и один сеанс не прошёл корреляционную обработку), 3 суток (127–129).

Таким образом, в первой фазе эксперимента ни по одному КА требуемые условия для определения эфемерид не выполняются. Наиболее полное покрытие орбит получено для КА с системным номером R07 из 35 отдельных сеансов на 6 сутках.

На втором интервале получены:

— R02 — 10 сеансов (4 сеанса с неполным числом баз), 8 суток (135–143);

— R07 — 7 сеансов (2 сеанса с неполным числом баз и один не реализован), 7 суток (135–142);

— R09 — 3 сеанса, 2 суток (140–141);

— R11 — 9 сеансов (3 сеанса с неполным числом баз и 1 не реализован), 3 суток (135–141) с отсутствием измерений в 137–140 сутки;

— R18 — 5 сеансов (2 сеанса с неполным числом баз), 4 суток (126–129);

— R21 — 7 сеансов (1 сеанс с неполным числом баз и один сеанс не прошёл корреляционную обработку), 3 суток (127–129).

В 140-е сутки нет измерений кроме R09.

Таким образом, и во второй фазе эксперимента ни по одному КА требуемые условия для определения эфемерид не выполняются, а условия хуже, чем в первой фазе эксперимента.

Поскольку при штатном расчёте орбит помимо шести кинематических параметров движения КА также необходимо уточнять 3 параметра модели радиационного давления, то ни по одному КА необходимый объём выборки ~80–90 часовых сеансов одной базы не набирается.

На полученном объёме измерений был проведен однократный расчёт параметров преобразования Гельмерта для координат РСДБ-станций с использованием апостериорных эфемерид четырех центров анализа (табл. 6).

Так, если оценки по КОС проводились на интервале 30 суток, то для РСДБ фактически реализованный интервал менее двух недель и прорежен, поэтому оценки более грубые, чем при оценивании по КОС. Параметры линейного смещения не наблюдаемы, что и следовало ожидать.

Параметры разворота при использовании апостериорных эфемерид различных центров анализа практически эквивалентны, но ввиду низкой информативности выборки не позволяют судить об абсолютной величине разворота. Тем не менее, наличие разворота СК, наблюдаемое при сравнении техник ГНСС и КОС, также подтверждается при сравнении техник ГНСС и РСДБ. Также подтверждается наличие масштабного коэффициента. В линейной мере параметры разворота и масштабного коэффициента оцениваются на сантиметровом уровне.

Основные результаты обработки и анализа РСДБ-задержки наблюдений, состоят в экспериментальном подтверждении:

1. Миллиметрового уровня (6–18 мм) точности интерпретации новой навигационной функции РСДБ-задержки, полученной по сигналам системы ГЛОНАСС при работе РСДБ-станций по навигационному сигналу в одночастотном режиме (диапазон L1).

2. Сантиметрового уровня точности определения рассогласования координат, формируемых с использованием различных техник (РСДБ – ГНСС – КОС).

Разработаны предложения по совершенствованию РСДБ-техники при работе по навигационным сигналам КА системы ГЛОНАСС.

Таблица 6

Оценка параметров преобразования Гельмерта с 126 по 143 сутки 2017 г. для координат станций РТ-32 относительно апостериорных эфемерид

Центр анализа	Показатель	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\omega_x$	$\omega_y$	$\omega_z$	$m, 10^{-9}$
		см			мс дуги			
PMK	МО	0.0	0.0	0.0	-1.5	0.1	0.5	-1.7
	СКО	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3	0.5
COD	МО	0.0	0.0	0.0	-1.5	0.1	0.5	-1.5
	СКО	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3	0.5
IAC	МО	0.0	0.0	0.0	-1.5	0.1	0.5	-1.3
	СКО	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3	0.5
ESA	МО	0.0	0.0	0.0	-1.5	0.1	0.5	-1.4
	СКО	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3	0.5

## Заключение

Предложен подход к решению проблемы повышения точности эфемерид ГЛОНАСС до уровня, обеспечивающего конкурентоспособность этой системы на мировом рынке соответствующих услуг. Подход основан на совместном использовании «техник» ГНСС, КОС и РСДБ с целью дальнейшей совместной обработки генерируемых измерений.

Показано, что необходимым условием для реализации предлагаемого подхода является процедура совмещения систем координат, используемых перечисленными техниками. Продемонстрирована возможность такого совмещения на примере совместного использования ГНСС-техники (апостериорные эфемериды), а также техник КОС и РСДБ (измерения по КА системы ГЛОНАСС).

Достигнут миллиметровый уровень интерпретации нового измеряемого параметра РСДБ-задержки при работе РСДБ-станций по сигналу КА системы ГЛОНАСС в частотном диапазоне L1.

## Литература

- Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 1. М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. 334 с.
- Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Общее описание системы с кодовым разделением сигналов (редакция 1.0). М.: 2016. 133 с.
- Иванов Д. В., Ипатов А. В., Пасынков В. В. и др. Использование узлов колокации для повышения точности системы ГЛОНАСС // Сб. тезисов докладов 7-й Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО – 2017). 2017. 3 с.
- Коен М. А. Теория оптимальных прикладных моделей ионосферы. Дисс... док. физ.-мат. наук. 01.04.12. Иркутск, 1984. 418 с.
- Пасынков В. В., Красильщиков М. Н., Кружков Д. М. Современные задачи совершенствования координатно-временного обеспечения ГЛОНАСС и перспективные методы их решения. II. Совмещение систем координат, используемых различными информационными технологиями в интересах уточнения всемирного времени // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2019. № 5. С. 108–116.
- Поляков В. М., Суходольская В. Е., Ивельская М. К., Шапранова Г. В. Полуэмпирическая модель ионосферы. Низкая и средняя солнечная активность / Межведомственный геофизический комитет при Президиуме академии наук СССР. Материалы мирового центра Б. М.: 1978. 112 с.
- Система прецизионной навигации МО РФ (Шифр ОКР – «Сантиметр»). Технический проект. Пояснительная записка. Часть 4. Центр определения прецизионной информации по данным международных средств (ЦПИ-М) СПН МО. Книга 3. Технологии расчета данных. ПЗ-03. М.: ОАО «НПК «СПП», 2014. 260 с.
- Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О. и др. Программный коррелятор для РСДБ-сети малых антенн // Труды ИПА РАН. 2012. Вып. 23. С. 84–88.
- Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О. и др. Радиointерферометрический коррелятор на графических процессорах // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 6. С. 1–9.
- Титов Е. В., Широкий С. М., Ильин Г. Н., Троицкий А. В. Экспериментальные оценки точности учета тропосферной задержки навигационных сигналов ГЛОНАСС по данным абсолютного радиометра водяного пара // Шестая всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО – 2015)». СПб.: ИПА РАН, 2015. С. 96.
- Черняков С. М. Создание адаптивной модели ионосферы на основе данных по полному электронному содержанию // Сборник научных трудов физико-математического факультета Мурманского государственного педагогического университета. 2003. С. 80–106.
- Validakis K., Heinkelmann R., Nilsson T., Schuh H. The IVS tropospheric combination. 23rd Working Meeting of the EVGA, IVS Analysis Workshop. Göteborg, 2017. URL: [http://media.gfz-potsdam.de/gfz/sec11/projects/tropospheric\\_combination\\_centre/Balidakis\\_IVS\\_tropo\\_combi.pdf](http://media.gfz-potsdam.de/gfz/sec11/projects/tropospheric_combination_centre/Balidakis_IVS_tropo_combi.pdf) (дата обращения: 07.12.2021).
- BeiDou navigation satellite system signal in Space interface control document. Open Service Signal B1I (Version 1.0). China Satellite Navigation Office, 2012.
- Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P. Bernese GNSS software. Version 5.2. V. 1 // Astronomical Institute, University of Bern, 2015.
- Feltens J. Chapman profile approach for 3-d Global TEC Representation // IGS Presentation in proceedings of the 1998 IGS Analysis Centers Workshop, ESOC, Darmstadt, Germany, February 9–11. 1998. P. 285–297.
- Galkin I. A., Reinisch B. W., Huang X., Bilitza D. Assimilation of GIRO data into a real-time IRI // Radio Sci. 2012. Vol. 47. RS0L07.
- Georgiadou Y., Kleusberg A. On the effect of ionospheric delay on geodetic relative GPS positioning // Manuscripta Geodaetica. 1988. Vol. 13, no. 1 P. 1–8.
- Hernández-Pajares M., Juan J. M., Sanz J. New approaches in global ionospheric determination using ground GPS data // Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics. 1999. Vol. 61. P. 1237–1247.
- ILRS study group. LARGE: LAsER Ranging to GNSS s/c Experiment — expanded SLR tracking of GNSS satellites [Электронный ресурс]. URL: [https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/science/ILRS\\_LARGE\\_sg/index.html](https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/science/ILRS_LARGE_sg/index.html) (дата обращения: 07.12.2021).
- IONEX: The IONosphere Maps EXchange Format Version 1 [Электронный ресурс]. URL: <ftp://ftp.aiub.unibe.ch/ionex/ionex1.pdf> (дата обращения: 13.05.2021).
- Jin R., Jin S., Feng G. M\_DCB: Matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases // GPS Solut. 2012. 16 P. 541–548.
- Klobuchar J. A. Ionospheric time-delay algorithms for single-frequency GPS Users // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1987. Vol. AES-23, no. 3. P. 325–331.
- Mannucci A. J., Wilson B. D., Yuan D. N., et al. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements // Radio Science. 1998. Vol. 33. P. 565–582.



Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces. Interface Control Document / IRN-200C-002. 1997.

*Schaer S.* Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System // Ph.D. dissertation, Astronomical Institute of the University of Bern. Bern, 1999. 208 p.

*Sung H., Yoaz E.* A new type of troposphere zenith path delay product of the international GNSS service // Journal of Geodes. Germany: Springer-Verlag GmbH, 2009. no. 83. P. 367–373.

*Wild U.* Ionosphere and geodetic satellite systems: permanent GPS tracking data for modelling and monitoring // Ph.D. dissertation, Geodätische-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz. Zürich, 1994. P. 48.

*Wilson B. D., Mannucci A. J., Edwards C. D.* Subdaily northern hemisphere ionospheric maps using an extensive network of GPS receivers // Radio Science. 1995. Vol. 03. P. 639–648.