

Требования Минобороны России к фундаментальному сегменту ГНСС ГЛОНАСС на период до 2030 г.

© А. В. Ивашина¹, И. С. Топорков¹, А. Н. Глуздов¹, Ю. В. Кулешов²,
И. В. Сахно², А. И. Косынкин², А. В. Козлов²

¹Космические войска воздушно-космических сил Минобороны России,
г. Москва, Россия

²Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург, Россия

Подведен итог решения задач в фундаментальном сегменте глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС в рамках федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы». Определен и сформулирован перечень задач перед фундаментальным сегментом глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС в новом плановом периоде до 2030 г. Заданы требования Минобороны России к фундаментальному сегменту глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС на период до 2030 г.

Ключевые слова: параметры вращения Земли, всемирное время, служба ПВЗ, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами, колокация.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.51.63-72>

Введение

Несмотря на то что фундаментальный сегмент глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) ГЛОНАСС формально не входит в состав космической системы, он задумывался и поддерживался в рамках действующей федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» (далее — ФЦП) как основа для решения следующих принципиальных для развития системы задач [1–4]:

— формирование и обновление фундаментальных астрономических и геодезических параметров, используемых в интересах повышения точности эфемеридно-временного обеспечения и точности навигационных решений потребителей;

— проведение поисковых исследований, направленных на дальнейшее повышение точностных характеристик ключевых составных частей системы;

— формирование технической и методической основы для создания в перспективе средств калибровки сквозного навигационного тракта и ключевых составных частей ГНСС ГЛОНАСС.

В соответствии с ФЦП в фундаментальный сегмент включены следующие составляющие:

- комплекс средств определения и прогнозирования параметров вращения Земли (ПВЗ);
- комплекс средств синхронизации и формирования UTC(SU);
- комплекс средств уточнения фундаментальных астрономических и геодезических параметров.

Следует отметить, что задачи, которые были поставлены перед фундаментальным сегментом, к началу нового программного периода в целом выполнены, необходимо детально осмыслить результаты, оценить вклад в повышение точностных характеристик ГНСС ГЛОНАСС и определить пути дальнейшего развития. В процессе уточнения направлений дальнейшего развития фундаментального сегмента в следующем программном периоде необходимо ориентироваться на достижение ключевых для ГНСС ГЛОНАСС показателей эффективности функционирования (принципиально важных для Минобороны России), к которым относятся следующие: глобальность, доступность и непрерывность, а также точность, автономность, надежность и помехоустойчивость.

Кроме того, необходимо оценить достигнутые результаты реализации мероприятий в рамках фундаментального сегмента ГНСС ГЛОНАСС, а также степень их востребованности в потребительском сегменте и в контуре управления орбитальной группировкой системы.

Задачи фундаментального сегмента до 2030 г.

Решение о формировании фундаментального сегмента в рамках ФЦП было правильным и своевременным решением, позволившим привлечь научные коллективы академических институтов к процессу создания системы ГЛОНАСС. Теперь же, на очередном витке развития отечественной спутниковой навигации, необходимо предпринять реальные шаги по более интенсивной интеграции результатов и заделов, полученных в фундаментальном сегменте, в реальный контур управления системой для безусловного решения к 2030 г. следующих ключевых для Российской Федерации задач в данной области:

- обеспечение технологической независимости системы и реализация мероприятий с учетом предлагаемых Минобороны России целевых показателей;
- достижение паритета по точностным характеристикам с зарубежными ГНСС и сохранение лидирующих позиций в области спутниковой навигации;
- нацеленность на реализацию критических технологий в области спутниковой навигации в сочетании с проведением регулярного аудита процесса разработок ключевых технологий и оценки повышения точности навигационных определений;
- нацеленность реализуемых в ходе ФЦП мероприятий на безусловное внедрение результатов до 2030 г.;
- обеспечение возможностей и условий для сохранения и подготовки коллективов разработчиков с целью дальнейшего развития и внедрения технологий спутниковой навигации;
- межведомственная консолидация усилий разработчиков в условиях ограниченных финансовых ресурсов с учетом приоритетов оборонного характера.

С учетом сформулированных задач и приоритетов на новый программный период развития системы, фундаментальный сегмент в 2021–2030 гг. должен включать в свой состав:

- комплекс средств определения и прогнозирования ПВЗ;
- комплекс средств синхронизации и формирования UTC(SU) [5];
- комплекс средств уточнения фундаментальных астрономических и геодезических параметров [6] (в том числе с использованием отечественных космических геодезических систем);
- комплекс верифицированных и постоянно поддерживаемых отечественных геофизических моделей для обеспечения функционирования ГНСС ГЛОНАСС (интегрированных в состав наземного комплекса управления (НКУ) системы ГЛОНАСС);
- комплекс технологий уточнения системы координат ПЗ-90.11 [7];
- комплекс средств (технологий) сверхвысокоточных измерений текущих навигационных параметров (ТНП) (в оптическом и радиодиапазонах) и их совместной обработки в реальном масштабе времени;
- комплекс средств (технологий) навигации по геофизическим полям.

С учетом предлагаемого расширенного состава фундаментального сегмента существенно увеличивается его значимость и появляется необходимость в пересмотре подходов не только к постановке задач, но и к их взаимной увязке по результатам и порядку внедрения в рамках основных мероприятий программы. Как уже отмечалось ранее, одним из основных требований должно стать более тесное интегрирование фундаментального сегмента в структуру системы, особенно в ее НКУ, и повышение точностных характеристик орбитального сегмента системы ГЛОНАСС. Далее рассмотрены наиболее важные направления реализации мероприятий в рамках фундаментального сегмента.

Требования к фундаментальному сегменту

Поскольку ключевым элементом любой ГНСС, использующей беззапретную технологию измерений ТНП, является бортовой стандарт частоты и времени (или бортовое синхронизирующее устройство (БСУ)), который в основном и определяет точностные характеристики системы, сначала будут рассмотрены требования в части развития бортовых и наземных средств синхронизации.

В настоящее время за рубежом основные усилия разработчиков направлены на снижение массогабаритных характеристик БСУ и потребляемой мощности в сочетании с повышением его относительной стабильности.

С учетом результатов, которые достигнуты за рубежом по характеристикам БСУ, включая показатель «масса БСУ — относительная нестабильность частоты», наилучших характеристик достигла система Galileo, использующая в составе навигационных космических аппаратов (НКА) пассивный водородный стандарт частоты (ПВСЧ) с суточной нестабильностью $5 \cdot 10^{-15}$. Указанный тип бортового стандарта частоты с учетом современного уровня развития отечественных технологий существенно превосходит по характеристикам цезиевый стандарт частоты, применяемый в настоящее время в составе БСУ НКА «Глонасс-М» и «Глонасс-К».

В США с 2012 г. проводится разработка БСУ на основе малогабаритного бортового стандарта частоты (на ионах ртуты) следующего поколения Deep Space Atomic Clock (DSAC) с заявленными в печати характеристиками и суточной нестабильностью $\sim 3 \cdot 10^{-15}$, которые существенно превосходят ПВСЧ по показателю «масса БСУ — относительная нестабильность». В настоящее время технология и опытный образец малогабаритного БСУ находятся на стадии летной отработки в составе малого КА-демонстратора [8, 9].

С целью обеспечения паритета в части характеристик БСУ (как ключевого элемента ГНСС ГЛОНАСС) с системами GPS и Galileo, в ходе реализации новой целевой программы в рамках фундаментального сегмента должны быть реализованы мероприятия, направленные на достижение следующих характеристик в части решения задач синхронизации частоты и времени:

1. Достижение уровня относительной нестабильности БСУ — $3-5 \cdot 10^{-15}$.
2. Достижение уровня относительной нестабильности центрального синхронизатора — $1-2 \cdot 10^{-16}$.
3. Снижение погрешности сравнения шкал времени территориально разнесенных эталонов времени и частоты (с вероятностью 0.95) — $3-5 \cdot 10^{-10}$.
4. Развитие технологий оперативного сличения шкал времени (ШВ).
5. Повышение надежности БСУ (срок службы не менее 12 лет).
6. Снижение массогабаритных характеристик и энергопотребления БСУ с учетом использования отечественной электронной компонентной базы.
7. Планирование мероприятий по приоритетному развитию технологий создания высоконадежных пассивных и активных водородных стандартов частоты.

При этом погрешность определения Всемирного времени средствами фундаментального сегмента должна составить величину не хуже 0.02–0.015 мс. Погрешность согласования шкалы времени системы ГЛОНАСС с UTS(SU) должна обеспечиваться к 2030 г. на уровне порядка 2 нс.

Таким образом, при планировании мероприятий программы в части комплекса средств синхронизации и формирования UTC(SU) фундаментального сегмента целесообразно исходить из указанных выше требований.

С целью повышения эффективности геофизического обеспечения применения системы ГЛОНАСС назрела необходимость формирования комплекса отечественных геофизических моделей (интегрированных в состав НКУ системы ГЛОНАСС), который также предлагается реализовать в новом программном периоде развития системы.

В состав комплекса отечественных геофизических моделей должны входить: модель ионосферы, модель тропосферы (на основе ГОСТ 26352-84), модель гравитационного поля Земли (на основе ПЗ-2011/360), модель магнитного поля Земли (на основе ГОСТ 25645.126-85), геодинамические модели земной поверхности. Предполагается, что указанные модели должны поддерживаться и верифицироваться на регулярной основе, в том числе с использованием средств фундаментального сегмента и применяться в контуре эфемеридно-временного обеспечения ГНСС ГЛОНАСС. Выбор конкретных моделей, интегрируемых в контур ГНСС ГЛОНАСС, потребует дополнительного уточнения и в конечном итоге приведет к унификации номенклатуры последних

в Российской Федерации. Программные реализации указанных моделей должны распространяться централизованно в соответствии с решением уполномоченных федеральных органов исполнительной власти.

В качестве основы для создания, поддержания и верификации указанных моделей должны применяться и развиваться в рамках целевой программы следующие технологии:

1. Спутниковые «затменные» измерения, включающие:
 - спутниковую радиотомографию;
 - трансионосферное радиозондирование сигналами спутниковых радионавигационных систем;
 - спутниковое радиозондирование ионосферы на частотах, близких к критическим;
 - вертикальное, наклонное и возвратно-наклонное радиозондирование ионосферы;
 - измерение локальных параметров космической плазмы на борту КА.
2. Спутниковые магнитометрические измерения.
3. Спутниковые градиентометрические измерения.
4. Наземные автоматизированные гравиметрические измерения.
5. Спутниковые геодезические измерения (альтиметрия, межспутниковые сверхвысокоточные измерения).
6. Сверхвысокоточные радио- и оптические измерения ТНП, в том числе с использованием методов радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ-методов).
7. Технологии хранения и комплексной обработки разнородных геофизических данных.
8. Технологии создания и применения станций колокации в рамках фундаментального сегмента.

Создание комплекса отечественных геофизических моделей будет гарантировать не только возможность дальнейшего повышения точностных характеристик эфемеридно-временного обеспечения и системы в целом, но также будет способствовать достижению технологической независимости развития ГНСС ГЛОНАСС и отечественных космических геодезических систем.

Особое место в составе фундаментального сегмента должно принадлежать комплексу средств (технологий) сверхвысокоточных измерений ТНП (в радио- и оптическом диапазонах) и их совместной обработки в реальном масштабе времени (рис. 1).

Основу комплекса средств развития технологий сверхвысокоточных измерений ТНП должен составить радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО» как постоянно действующая отечественная радиоинтерферометрическая сеть со сверхдлинными базами. На базе комплекса «Квазар-КВО» должны на постоянной основе обрабатываться алгоритмические и программные решения по совместной обработке высокоточных измерений в оптическом и радиодиапазонах, а также технологии взаимной калибровки измерительных средств.

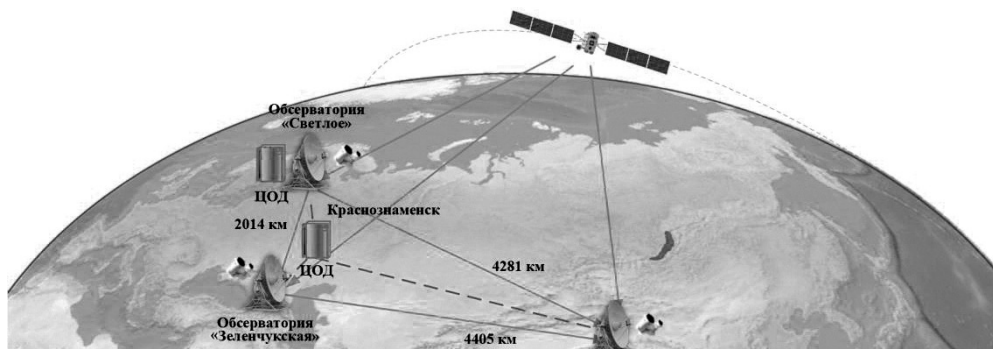


Рис. 1. Структура комплекса средств сверхвысокоточных измерений текущих навигационных параметров при решении задач совместных измерений ТНП НКА ГЛОНАСС

Возможности уникального комплекса средств целесообразно ориентировать на более тесное взаимодействие с НКУ ГЛОНАСС и решение следующих прикладных задач:

1. Уточнение положения фазового центра бортового антенно-фидерного устройства НКА ГЛОНАСС в одночастотном и двухчастотном режимах ($3-7$ мм (σ)).
2. Повышение точности эфемеридного обеспечения ГНСС ГЛОНАСС до $0.04-0.05$ м.
3. Формирование соответствующих эталонов и калибровка измерительных средств в составе орбитального сегмента и НКУ системы ГЛОНАСС: беззапросная измерительная станция, межспутниковая радиолиния, бортовая аппаратура угломерной системы и др.
4. Обоснование направлений модернизации сети беззапросных измерительных станций в составе НКУ.
5. Верификация геофизических моделей.
6. Отработка технологий оценки немоделируемых ускорений НКА.
7. Отработка технологий высокоточной синхронизации бортовых и наземных стандартов частоты и времени. Уточнение характеристик БСУ НКА и бортовой шкалы времени системы ГЛОНАСС.
8. Повышение точности определения ПВЗ (координат полюса) до значений $0.002-0.005$ м в апостериорном и оперативном режимах.
9. Внедрение РСДБ-технологий в структуру НКУ ГЛОНАСС.

В первую очередь интеграция с НКУ ГЛОНАСС может достигаться посредством организации обработки информации при решении вышеуказанных задач как на базе комплекса «Квazar-КВО», так и на базе технических средств НКУ системы ГЛОНАСС с использованием специализированного центра обработки данных (ЦОД).

Вторым направлением интеграции с НКУ является реализация РСДБ-технологий с использованием крупноапертурных антенн Минобороны России и разветвленной сети пунктов системы единого времени для реализации РСДБ-технологий в обеспечение повышения точностных характеристик эфемеридно-временной информации.

Третьим направлением интеграции с НКУ должно стать взаимодействие средств фундаментального сегмента на этапе проведения испытаний составных частей системы и ГНСС ГЛОНАСС в целом. Следует отметить, что новый программный период будет характеризоваться началом полномасштабной эксплуатации ГНСС ГЛОНАСС. Указанное обстоятельство будет прежде всего относиться к орбитальному сегменту и НКУ системы. Поэтому на первый план выйдет системная задача, связанная с проведением испытаний системы и ее составных частей с целью определения вклада каждого средства в тактико-технические характеристики (ТТХ) системы и оценку ТТХ системы в целом, что необходимо для решения следующих задач:

- обеспечение международных обязательств РФ;
- обеспечение проведения испытаний составных частей ГНСС ГЛОНАСС в ходе эксплуатации;
- подтверждение тактико-технических требований (ТТТ) и показателей эффективности ГНСС ГЛОНАСС на этапе эксплуатации и при модернизации составных частей;
- контроль ТТХ системы и ее составных частей;
- сравнительная оценка ГНСС ГЛОНАСС с зарубежными навигационными системами (на постоянной основе);
- обоснование и контроль эффективности мероприятий технического надзора в ходе эксплуатации составных частей системы;
- определение направлений модернизации составных частей системы;
- реализация и контроль эффективности мероприятий модели эксплуатации ГНСС ГЛОНАСС;
- создание эффективной системы контроля технического состояния и точностных характеристик всех составных частей ГНСС ГЛОНАСС;
- создание единой методической и моделирующей базы ГНСС ГЛОНАСС;
- создание эффективной системы входного контроля характеристик разрабатываемого СПО и технических средств;
- разграничение функций управления и мониторинга в ГНСС ГЛОНАСС.

Для решения указанных задач предполагается сформировать в составе системы территориально-распределенный комплекс средств проведения испытаний (КСПИ) ГНСС ГЛОНАСС, без взаимодействия которого со средствами фундаментального сегмента решение перечисленных выше задач в полном объеме и с требуемым качеством не представляется возможным. Средства фундаментального сегмента могут, например, выполнять функции формирования эталонных значений параметров, которые затем будут использоваться в ходе испытаний измерительных средств в составе НКУ. Внедрение КСПИ должно позволить организовать на современном уровне сопровождение эксплуатации системы, обеспечить подтверждение вклада в системные (точностные и др.) характеристики каждой из составных частей.

На рис. 2 представлена схема взаимодействия территориально-распределенного КСПИ при решении задач по предназначению.

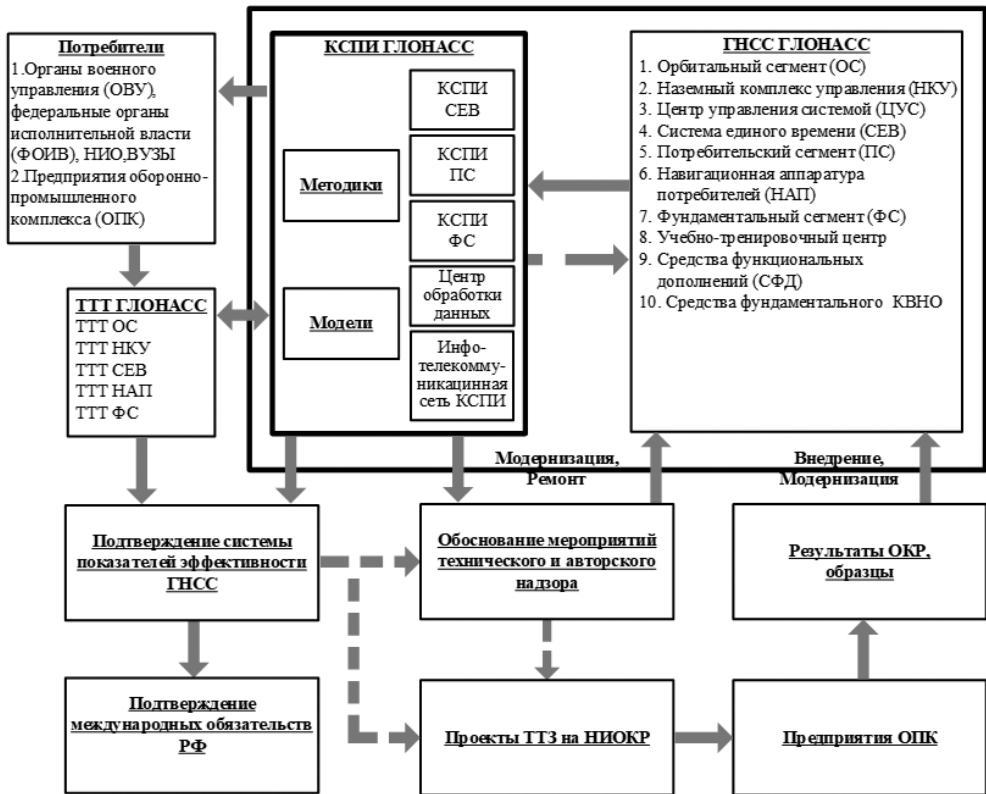


Рис. 2. Схема взаимодействия территориально-распределенного комплекса средств проведения испытаний ГНСС ГЛОНАСС при решении задач по предназначению

Заключение

В заключении необходимо отметить, что фундаментальный сегмент на новом этапе своего развития должен существенно усилить свою значимость и свой вклад в дальнейшее повышение точностных и метрологических характеристик системы, в повышение эффективности применения ГНСС ГЛОНАСС. Руководящими принципами в ходе выполнения мероприятий новой целевой программы в части фундаментального сегмента должны стать:

- приоритет внедрения обрабатываемых технологий до окончания нового программного периода (то есть до 2030 г.);
- приоритет отработки критических технологий в интересах повышения точностных характеристик измерительных средств системы и средств определения фундаментальных характеристик. Должна быть реализована следующая последовательность отработки технологий: сначала в рамках научно-исследовательских работ на базе средств фундаментального сегмента, затем — в рамках ОКР для внедрения в структуру НКУ;
- приоритет дальнейшего повышения точностных характеристик системы ГЛОНАСС и обеспечение ее конкурентоспособности;

— приоритет обеспечения технологической независимости системы ГЛОНАСС (в том числе в части фундаментального сегмента);

— использование единых согласованных с Минобороны России методик измерений и протоколов информационного взаимодействия.

Реализация указанных принципов будет способствовать решению всех приведенных выше задач и выходу системы ГЛОНАСС на новый уровень своего развития к 2030 г.

Л и т е р а т у р а

1. Федеральная целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы». Утверждена Постановлением Правительства РФ от 3 марта 2012 г. № 189.

2. Дворкин В. В., Носенко Ю. И., Урличич Ю. М., Финкельштейн А. М. Российская глобальная спутниковая навигационная система // Вестник Российской академии наук, 2009. — Т. 79, №1. — С. 10–17.

3. ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. — 3-е изд., перераб. — М.: Радиотехника, 2005. — 688 с.

4. Шебшаевич В. С., Дмитриев П. П., Иванцев Н. В. и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / под ред. В. С. Шебшаевича. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1993. — 408 с.

5. ГОСТ Р 8.739–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны для координатно-временных измерений. Основные положения. Способы выражения погрешностей. — М.: Стандартинформ, 2019. — 16 с.

6. ГОСТ Р 55536–2013. Глобальная навигационная спутниковая система. Методы и технологии выполнения геодезических работ. Общие требования к фундаментальным геодезическим параметрам. — М.: Стандартинформ, 2014. — 8 с.

7. Параметры Земли 1990 года (ПЗ–90.11). Справочный документ. — ВТУ ГШ ВС РФ, 2014.

8. Ely T., Murphy D. W., Seubert J., Bell J., Kuang Da. Expected performance of the deep space atomic clock mission. — 2018. — URL: <https://www.researchgate.net/publication/260036335>.

9. Ely T. Mission countdown for deep space atomic clock december. — 2018. — URL: <https://www.gps.gov/governance/advisory/meetings/2018-12/ely.pdf>.

The Requirements Set Forth by the Ministry of Defense of the Russian Federation to Be Met by the Fundamental Segment of the GNSS GLONASS before 2030

**A. V. Ivashina, I. S. Toporkov, A. N. Gluzdov, Yu. V. Kuleshov,
I. V. Sakhno, A. I. Kosynkin, A. V. Kozlov**

The GLONASS (Global Navigation Satellite System) has summarised the results of problem solving in its fundamental segment according to the Federal Target Program "Maintenance, Development and Use of the GLONASS System from 2012 to 2020". The new planning period list of goals for the GLONASS fundamental segment is worked out and formulated until 2030. The new requirements have been set forth by the Ministry of Defense of the Russian Federation to be met by the fundamental segment of the GNSS GLONASS before 2030.

Keywords: Earth orientation parameters (EOP), universal time, EOP service, radio interferometry with very long baselines (VLBI), colocation.