

УДК 006.92:521.9

**ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ
ГЛОНАСС. ДОСТИГНУТЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ —
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

**И.Ю. Блинов, Ю.Ф. Смирнов, М.Н. Хромов,
С.Н. Слюсарев, В.Г. Пальчиков**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,

*blinov@vniiftri.ru,
yfsmirnov@vniiftri.ru,
khromov@vniiftri.ru,
serslyu@meil.ru,
palchikov@vniiftri.ru*

Аннотация. В статье говорится о фундаментальных исследованиях частотно-временных измерений, которые будут иметь важнейшее значение для развития системы ГЛОНАСС на новом этапе в современных условиях.

Кратко изложены результаты работ по созданию технических средств фундаментального обеспечения ГЛОНАСС. Подчёркивается, что ключевую роль в их достижениях сыграло использование перспективных технологий, таких как охлаждение рабочих атомов, взаимодействие холодных атомов с зондирующими сигналами в радио- и оптическом диапазонах, а также в совершенствовании квантовых стандартов частоты водородного тока.

Полученные результаты будут использованы при эксплуатации системы ГЛОНАСС. Планируется ряд работ по повышению точности воспроизведения и хранения единиц времени и частоты за счёт разработки нового поколения оптических стандартов частоты, стандартов частоты фонтанного типа, водородных стандартов и средств сличения.

Ключевые слова: система ГЛОНАСС, фундаментальное обеспечение, результаты, перспективы ГМЦ ГСВЧ, государственный эталон, квантовые стандарты частоты, средства сличения.

**FUNDAMENTAL SUPPORT OF GLONASS SYSTEM.
ACHIEVED RESULTS — PROSPECTS FOR DEVELOPMENT**

**I.Yu. Blinov, Yu.F. Smirnov, M.N. Khromov,
S.N. Slyusarev, V.G. Palchikov**

FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region, Russia,

*blinov@vniiftri.ru,
yfsmirnov@vniiftri.ru,
khromov@vniiftri.ru,
serslyu@meil.ru,
palchikov@vniiftri.ru*

Annotation. The article talks about fundamental research of time-frequency measurements, which will be of great importance for the development of the GLONASS system at a new stage in modern conditions.

The results of work on the creation of technical means of fundamental support for GLONASS are briefly stated. It is emphasized that the key role in their achievements was played by the use of promising technologies, such as the cooling of working atoms, the interaction of cold atoms with probe signals in the radio and optical ranges, as well as in the improvement of quantum standards for the frequency of the hydrogen current.

The results obtained will be used when operating the GLONASS system. A number of works are planned to improve the accuracy of reproduction and storage of time and frequency units due to development of a new generation of optical frequency standards, fountain-type frequency standards, hydrogen standards and means of comparison.

Key words: GLONASS system, fundamental support, results, prospects of the MMC SSTF, state standard, quantum frequency standards, means of comparison.

В современных условиях, в сложный период развития экономики намечаются новые ориентиры развития национальных проектов и программ. В соответствии с развитием ГЛОНАСС в новых условиях учтены современные требования к фундаментальному обеспечению. Важнейшее значение будут иметь фундаментальные исследования по воспроизведению, хранению единиц времени и частоты, формированию национальной шкалы времени, точному её распространению и определению параметров вращения Земли. Особая роль здесь отводится Главному метрологическому центру Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли РФ (ГМЦ ГСВЧ).

ГМЦ ГСВЧ активно участвует в развитии системы ГЛОНАСС в части создания, поддержания и совершенствования средств и систем Государственного эталона единиц времени и частоты, координации работ по частотно-временному обеспечению комплекса наземных средств формирования шкалы времени системы ГЛОНАСС.

В рамках следующего этапа развития системы ГЛОНАСС предстоит серьёзная работа по повышению эффективности фундаментального обеспечения ГЛОНАСС с учётом темпов совершенствования самой системы.

Предварительно рассмотрим результаты работ по созданию технических средств фундаментального обеспечения ГЛОНАСС.

Ниже представлены результаты, которые в Российской Федерации получены впервые и находятся на уровне зарубежных аналогов. Ключевую роль в этом сыграло использование перспективных технологий, таких как охлаждение рабочих атомов, взаимодействие холодных атомов с зондирующими сигналами в радио- и оптическом диапазонах частот, а также совершенствование квантовых стандартов частоты водородного типа.

Среди результатов последнего времени:

- Введён в эксплуатацию комплекс высокоточных средств сличений национальной шкалы координатного времени UTC(SU) со шкалой времени

ГЛОНАСС, который включает перевозимые квантовые часы, обеспечивающие хранение шкалы времени с погрешностью не более 1 нс на интервале наблюдения 1 сутки и при времени транспортирования не более 12 ч, а также комплекс дуплексных сравнений шкал времени, обеспечивающий сравнение с пределами допускаемой погрешности $\pm 1,5$ нс.

- Модернизированы и введены в эксплуатацию комплексы хранения шкалы времени вторичного эталона единиц времени и частоты ВЭТ 1-5 (Иркутск) и РЭТ 1-1 (Петропавловск-Камчатский), обеспечивающие суммарную погрешность не более $3 \cdot 10^{-15}$ и имеющие пределы допускаемого смещения шкалы времени комплекса относительно национальной шкалы времени UTC(SU) ± 10 нс.
- Разработан оптический репер частоты наземного базирования на холодных атомах стронция (рис. 1) с погрешностью воспроизведения единицы частоты и времени не более $1 \cdot 10^{-17}$.

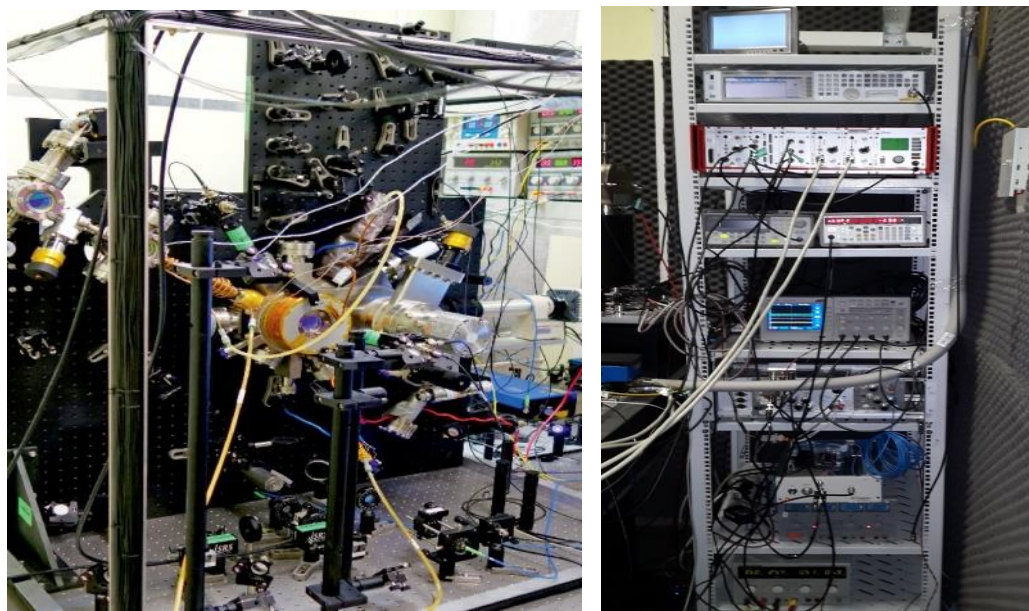


Рис. 1. Оптический репер частоты

- Созданы хранители единиц времени и частоты на основе «фонтана» атомов рубидия, имеющие нестабильность частоты не более $2 \cdot 10^{-16}$, для оснащения эталонов единиц времени и частоты и последующей передачи более точной время-частотной информации прецизионным наземным и бортовым средствам и системам ГЛОНАСС (рис. 2).

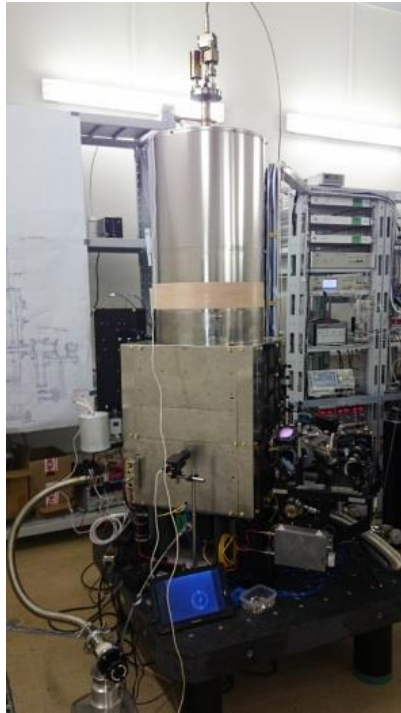


Рис. 2. Хранитель единиц времени и частоты на основе «фонтана» атомов рубидия

Отдельно стоит остановиться на разработке малогабаритных стандартов. Значительное внимание ведущих стран мира уделяется разработке малогабаритных стандартов частоты, имеющих объём до нескольких десятков кубических сантиметров, с точностными характеристиками, сравнимыми с уже существующими цезиевыми, водородными и рубидиевыми стандартами частоты. Задачи и цели этих разработок направлены на повышение эффективности автономного навигационного обеспечения перспективных морских, наземных, воздушных и космических объектов. Создание малогабаритного высокостабильного квантового стандарта частоты позволит реализовать в бóльшем объёме в прецизионной аппаратуре потребителей ГЛОНАСС потенциальные точности этой системы. Применение в этих стандартах эффекта когерентного пленения населённостей (КПН) даёт возможность отказаться от использований СВЧ-резонатора, что позволяет кардинально уменьшить размеры стандарта при сохранении высоких метрологических характеристик. В рамках выполнения мероприятий ФЦП ГЛОНАСС во ФГУП «ВНИИФТРИ» разработан сверхминиатюрный высокостабильный квантовый стандарт частоты на основе эффекта когерентного пленения населённостей для прецизионной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС.

Разработанный сверхминиатюрный стандарт времени и частоты является первым реализованным стандартом подобного типа в России (рис. 3а).

Впервые в России создана и освоена технология изготовления сверхминиатюрных рубидиевых ячеек, а также технология производства лазеров в миниатюрном (на уровне нескольких кубических миллиметров) исполнении. Продемонстрирована долговременная непрерывная автономная работа (более нескольких месяцев) стандарта, а также достигнута высокая долговременная нестабильность частоты (порядка нескольких единиц 10^{-12}) на суточном интервале измерений, что соответствует передовому мировому уровню (рис. 3б).

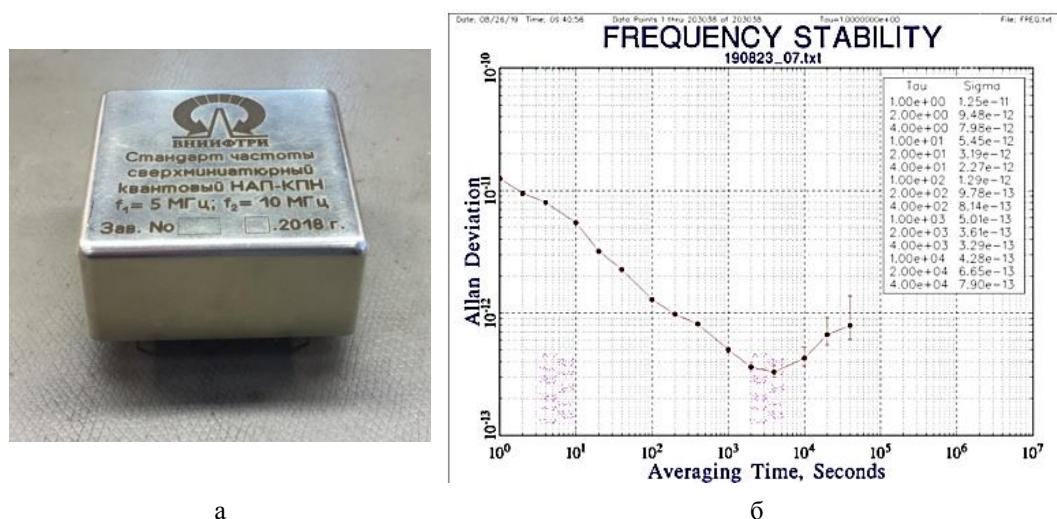


Рис. 3. Атомный стандарт времени и частоты на КПН-эффekte с объёмом 60 см³:
а — общий вид; б — нестабильность частоты атомного стандарта

Спутниковые глобальные навигационные системы, такие как ГЛОНАСС или GPS, получают существенное развитие вместе с развитием технологии компактных высокостабильных часов. Усовершенствование часов как ключевого элемента различных систем навигации позволит детектировать объекты с точностью до десятков и даже единиц сантиметров, что на один-два порядка лучше, чем это возможно сейчас.

Помимо отмеченных выше областей применения, разработанный стандарт частоты может быть использован в качестве элемента навигационно-временных устройств для изделий высокоточного применения, обеспечивая их прогнозируемой временной информацией с требуемой точностью при потере сигналов ГНСС.

Разработка высокоточных квантовых стандартов времени и частоты для перспективных навигационных, геодезических и цифровых технологий заложила фундамент, открыла новые перспективы совершенствования Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018 с целью повышения точностных характеристик

эталонных сигналов времени и частоты ГСВЧ и для обеспечения функционирования Глобальной навигационной системы ГЛОНАСС, а также для единства измерений времени и частоты в сетях промышленного интернета в процессе цифровой трансформации экономики.

Полученные результаты позволили обеспечить возможность выполнения показателей системы ГЛОНАСС на 2020 год, способствуя внедрению отечественных навигационных технологий как в Российской Федерации, так и за рубежом, что помогает решать задачи обеспечения национальной безопасности и социально-экономического развития страны. Результаты будут использованы при эксплуатации системы ГЛОНАСС, в первую очередь в части средств фундаментального обеспечения.

Требования к точности позиционирования с помощью глобальных навигационных спутниковых систем с момента их появления растут непрерывно, что повышает требования и к фундаментальному обеспечению, в том числе частотно-временному. С учётом развития системы ГЛОНАСС планируется ряд работ по повышению точности воспроизведения и хранения единиц времени и частоты за счёт разработки нового поколения оптических стандартов частоты, стандартов частоты фонтанного типа, водородных стандартов и средств сличения [1].

В части модернизации Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018 планируется разработка комплекса воспроизведения единицы частоты с улучшенными метрологическими характеристиками. В состав этого комплекса войдут опытный образец метрологического цезиевого репера частоты фонтанного типа и опытный образец репера частоты фонтанного типа на холодных атомах рублидия. При разработке новых опытных образцов стандартов частоты фонтанного типа будет учитываться опыт разработки и эксплуатации ранее изготовленных изделий. Претерпит изменения конфигурация лазерно-оптической системы метрологического цезиевого репера (МЦР). Планируются изменения в узле стабилизации частоты излучения лазеров, использующихся для охлаждения рабочих атомов и детектирования их энергетических состояний. Будут изменены некоторые узлы в вакуумной части изделия с целью повышения надёжности, поддержания необходимого уровня вакуума в изделии и упрощения процесса сборки. Планируется улучшение метрологических характеристик МЦР, неисключённая систематическая относительная погрешность воспроизведения единицы частоты опытным образцом метрологического цезиевого репера частоты фонтанного типа составит не более $4 \cdot 10^{-16}$.

При разработке рубидиевого репера частоты фонтанного типа планируется создание лазерно-оптической системы на базе волоконных лазеров, что позволит улучшить стабилизацию лазерного излучения по частоте и повысить стабильность энергетических характеристик системы [2]. Неисключённая

систематическая относительная погрешность воспроизведения единицы частоты опытным образцом рубидиевого репера частоты фонтанного типа составит не более $3 \cdot 10^{-16}$.

В ближайшие 10 лет планируется модернизация вторичных эталонов, расположенных в филиалах ФГУП «ВНИИФТРИ»: ВЭТ 1-7 (Хабаровск), ВЭТ 1-19 (Новосибирск), РЭТ 1-1 и ВЭТ 1-5 (Иркутск), РЭТ 1-1 (Петропавловск-Камчатский).

Комплексы хранения шкалы времени эталонов единиц времени и частоты ВЭТ 1-5, ВЭТ 1-7, ВЭТ 1-19, РЭТ 1-1 должны обеспечивать формирование и хранение шкалы времени эталона, приближённой с заданной точностью к национальной шкале времени, в реальном масштабе времени.

Планируется оснащение вторичных эталонов эталонными комплексами времени и частоты ЭКВЧ-Н и комплексами средств технического обеспечения.

Опытный образец эталонного комплекса времени и частоты ЭКВЧ-Н должен обеспечивать формирование и хранение шкалы времени комплекса, приближённой с заданной точностью к национальной шкале времени, в реальном масштабе времени.

Опытный образец эталонного комплекса времени и частоты ЭКВЧ-Н должен обеспечивать сравнение шкалы времени комплекса с национальной шкалой времени с заданной точностью:

- суммарная погрешность комплекса не более $2 \cdot 10^{-15}$;
- пределы допускаемого смещения шкалы времени комплекса относительно национальной шкалы времени ± 5 нс.

При модернизации вторичного эталона ВЭТ 1-5 помимо эталонного комплексами времени и частоты ЭКВЧ-Н планируется оснащение комплексом аппаратуры хранения единицы частоты на основе «фонтана» атомов рубидия, что позволит снизить влияние дрейфа частоты водородных стандартов на формирование шкалы.

Хранитель единиц частоты на холодных атомах рубидия и с улучшенными метрологическими характеристиками должен обеспечивать хранение единицы частоты с нестабильностью единицы частоты (среднеквадратическое относительное двухвыборочное отклонение, СКДО) — не более $1 \cdot 10^{-16}$ на интервале времени измерения 14 суток.

Остановимся на перспективах развития оптических стандартов частоты.

Тактико-технические требования ГЛОНАСС в части средств частотно-временного обеспечения и Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени претерпевают значительные изменения, особенно для неисключённой систематической погрешности (НСП) воспроизведения единиц времени и частоты. К 2025 г. НСП должна составить $\pm 5 \cdot 10^{-18}$, а к 2030 г. — $\pm 1 \cdot 10^{-18}$. Достижение таких точностей возможно только при использовании новейших оптических стандартов частоты и последних научно-технических достижений.

Точность оптических стандартов частоты основана на предполагаемом постоянстве фундаментальных констант, а также на оценках и контроле спектральных характеристик атомов. В то время как ионные стандарты частоты, основанные на использовании квадрупольных ловушек Пауля, обладают наивысшей на сегодняшний день точностью, учёт квантового проекционного шума для этих ионов требует времени усреднения порядка нескольких дней для достижения заданной точности.

Напротив, стандарты частоты на нейтральных атомах с использованием оптических решёток позволяют кардинально уменьшить сдвиги частоты, обусловленные влиянием лазерного поля решётки. При этом время усреднения значительно сокращается за счёт одновременного использования большого количества атомов, захваченных оптической решёткой.

Стабильность стандартов частоты, приближающаяся к $10^{-16} (\tau/c)^{-1/2}$, была продемонстрирована путём применения лазеров, стабилизированных криогенным резонатором. Такая стабильность позволяет получить неопределённость уровня 10^{-18} за несколько часов работы стандартов частоты. В том числе она позволяет проводить обширные исследования систематических неопределённостей, таких как столкновительные сдвиги между спин-поляризованными фермионами и световые сдвиги, возникающие из-за эффектов гиперполяризуемости и мультиполярности взаимодействия атомов с оптическими решётками. Хотя использование магической длины волны позволяет подавить возмущения, связанные со штарковским сдвигом частоты оптической решётки, сдвиг частоты, вызванный окружающим электрическим полем, включающим излучение чёрного тела, остаётся основным возмущением в часах на оптической решётке с Sr и Yb.

Исследования сдвига частоты, возникающего из-за излучения чёрного тела, показали возможность достижения неопределённости частоты уровня $5 \cdot 10^{-18}$ путём корректировки сдвига при комнатной температуре. Для достижения такой погрешности требуется оценка температуры окружающей среды с погрешностью меньше $\Delta T = 70$ мК. Для получения неопределённости частоты уровня $1 \cdot 10^{-18}$ применяется другая стратегия, а именно контроль температуры в области захвата атомов с точностью 0,5 К. Такая точность может достигаться с помощью криогенных стандартов частоты на оптической решётке Sr или Yb.

Таким образом, для достижения относительной погрешности частоты уровня $1 \cdot 10^{-18}$ необходимо создать пару криогенных стандартов частоты на оптической решётке Sr. Криогенные стандарты частоты позволят непосредственно исследовать сдвиг, вызванный излучением чёрного тела. Синхронное сравнение двух криогенных стандартов частоты позволит нам достичь погрешности часов на уровне $1 \cdot 10^{-18}$ за время усреднения 4 часа. Такая стабильность полезна при сравнении двух разнесённых часов, соединённых оптоволоконной линией, что откроет новые возможности для измерения гравитационного смещения часов в качестве инструмента геодезии.

Перспективы развития Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени и вторичных эталонов единиц времени и частоты, расположенных в филиалах ФГУП «ВНИИФТРИ», соответствуют требованиям ГЛОНАСС, выдвигаемым на следующее десятилетие.

Разработки, проведённые на предыдущем этапе развития ГЛОНАСС, свидетельствуют о большом и успешном опыте у ФГУП «ВНИИФТРИ» по разработке эталонных комплексов и стандартов частоты на уровне лучших мировых образцов. Получение подобных результатов возможно только при разработке и использовании самых современных технологий в области стабилизации частоты излучения лазеров, охлаждения рабочих атомов, формирования опросных сигналов различных частотных диапазонов.

Накопленный опыт по созданию уникальных изделий позволяет ФГУП «ВНИИФТРИ» надеяться на успешное выполнение задач по развитию фундаментального обеспечения ГЛОНАСС.

Список литературы

1. Донченко С.И., Блинов И.Ю., Норец И.Б., Смирнов Ю.Ф., Беляев А.А., Демидов Н.А., Сахаров Б.А., Воронцов В.Г. Характеристики долговременной нестабильности водородных стандартов частоты и времени нового поколения // Измерительная техника. 2020. № 1. С. 35–38.
2. Блинов И.Ю., Курчанов А.Ф., Пьявкина В.В., Сальников А.С. О наблюдении КПН-эффекта в природной рубидии // Альманах современной метрологии. 2020. № 3. С. 115–127.

Статья поступила в редакцию: 20.11.2020 г.

Статья прошла рецензирование: 04.12.2020 г.

Статья принята в работу: 07.12.2020 г.