Развитие эталонной базы

УДК 006.91:531.761.081

# ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕРВИЧНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦ ВРЕМЕНИ, ЧАСТОТЫ И НАЦИОНАЛЬНОЙ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ ГЭТ 1-2012. ИСТОРИЯ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

**И.Б. Норец, Ю.Ф. Смирнов, Ю.Д. Иванова**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.*
*norets_igor@vniiftri.ru*

*Приведены краткие исторические сведения о Государственном первичном эталоне единиц времени, частоты и национальной шкалы времени, приведены результаты оценки основных метрологических характеристик эталона и его составных частей на интервале наблюдений 2014-2015 гг., а также освещены перспективы развития эталона.*

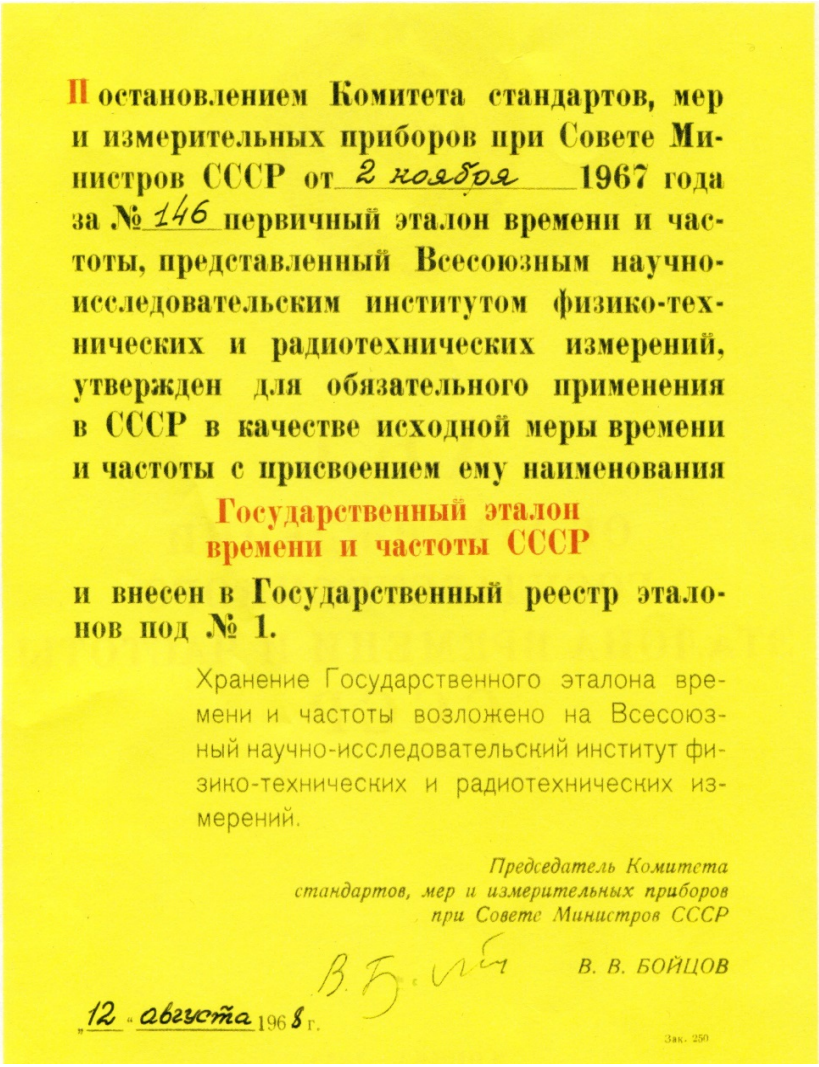
*Ключевые слова: государственный эталон, единицы времени и частоты, национальная шкала времени*

## 1. Краткие исторические сведения о ГЭВЧ

Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (ГЭВЧ) впервые был аттестован и утвержден Госстандартом СССР в 1967 году. В его состав входили водородные и кварцевые стандарты частоты, аппаратура внутренних и внешних сличений, аппаратура формирования рабочих шкал времени, а также средства технического обеспечения эталона.

С ростом требований потребителей к его точности и стабильности, а также с развитием средств воспроизведения, хранения и передачи единиц времени и частоты ГЭВЧ непрерывно развивался и совершенствовался. Так, в 1973 году в его состав были введены модернизированные водородные стандарты частоты и кварцевые генераторы, что позволило в марте 1974 года аттестовать эталон с улучшенными характеристиками, а в июле того же года утвердить ГОСТ 8.129-74 «Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты».

До 1976 года был проведён большой комплекс работ по модернизации эталона. Разработаны и введены в эксплуатацию новые водородные стандарты, цезиевые стандарты частоты фирмы «Hewlett-Packard». ГМЦ ГСВЧ был оснащён модернизированным наземным стационарным приёмным пунктом СЕВ «Миндаль». В этот период на основе ЭВМ была впервые автоматизирована работа системы внутренних сличений эталона, а также обработка полученных результатов измерений и расчёт национальной шкалы времени (НШВ). В состав эталона вошли перевозимые квантовые часы.



Постановлением Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР от 2 ноября 1967 года за № 146 первичный эталон времени и частоты, представленный Всесоюзным научно-исследовательским институтом физико-технических и радиотехнических измерений, утвержден для обязательного применения в СССР в качестве исходной меры времени и частоты с присвоением ему наименования

**Государственный эталон времени и частоты СССР**

и внесен в Государственный реестр эталонов под № 1.

Хранение Государственного эталона времени и частоты возложено на Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений.

*Председатель Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР*

В. В. БОЙЦОВ

„12" августа 1968 г.

Зак. 250

Рис. 1. Акт об утверждении ГЭВЧ от 12.08.1968 г.

Принципиальным было и то, что специалистами ВНИИФТРИ был разработан и введен в состав эталона первый метрологический цезиевый репер частоты МЦР-101. С этого момента ГЭВЧ независимо воспроизводит единицы времени и частоты в соответствии с определением секунды в системе СИ, принятом в 1967 году на тринадцатой Генеральной Конференции мер и весов. В 1976 году эталон был переутверждён с новыми характеристиками, а в 1977 году обновлён и ГОСТ 8.129.

Переаттестации 1983 года предшествовало несколько серьёзных НИР и ОКР, в результате выполнения которых были разработаны и введены в состав ГЭВЧ эталонные комплексы времени и частоты (ЭКВЧ) «Чайка». В

1978 году был создан МЦР-102, который с незначительными доработками являлся основным средством воспроизведения единиц времени и частоты вплоть до 2012 года. Также были усовершенствованы методы и технические средства передачи эталонных сигналов частоты и времени (ЭСЧВ) по телевиденью и по сигналам радионавигационных станций. Разработана и введена в эксплуатацию аппаратура сравнения шкал времени по радиометеорным каналам. В состав эталона был введён радиооптический частотный мост РОЧМ-101, позволивший расширить диапазон измеряемых частот до $1{,}0 \cdot 10^{14}$ Гц [1]. В 1983 году характеристики эталона в очередной раз были значительно улучшены, и как следствие вышла в свет новая редакция ГОСТ 8.129.

В период с 1984 по 1994 годы к работам по созданию ГЭВЧ нового поколения были привлечены в качестве соисполнителей такие организации как ФИАН, ННИПИ «Кварц», ОАО «РИРВ» и др. По итогам выполненных работ в состав эталона были включены новые ЭКВЧ «Чайка-Квант», модернизирован МЦР-102, обновлён парк стандартов частоты и времени водородных. В составе ГЭВЧ эксплуатировалось шесть комплектов СЧВВ типа Ч1-80, а также 4 стандарта типа Ч1-75. Эталон был оснащён аппаратурой сравнения шкал времени по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS. К моменту переаттестации переработаны методика ведения эталона, его нормативная документация, разработан и внедрён новый пакет специального программного обеспечения, обработки результатов измерений и расчёта НШВ [2]. Постановлением Госстандарта России от 4 марта 1998 года №9 ГЭВЧ был утверждён с новыми характеристиками, что повлекло за собой введение в действие новой редакции ГОСТ 8.129. Сравнительные характеристики ГЭВЧ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные метрологические характеристики
ГЭВЧ в период с 1967 по 1998 годы

| Год | Характеристика | | |
|---|---|---|---|
| | Относительная неисключенная систематическая погрешность воспроизведения единиц времени и частоты | Относительная нестабильность единиц времени и частоты | Пределы допускаемых смещений UTC(SU) относительно UTC |
| 1967 | - | $1{,}0 \cdot 10^{-11}$ | 300 мкс |
| 1976 | $1{,}0 \cdot 10^{-12}$ | $1{,}0 \cdot 10^{-13}$ | 5 мкс |
| 1984 | $2{,}0 \cdot 10^{-13}$ | $5{,}0 \cdot 10^{-14}$ | 1 мкс |
| 1998 | $5{,}0 \cdot 10^{-14}$ | $5{,}0 \cdot 10^{-15}$ | 100 нс |

Рис. 2. Пушкин Сергей Борисович (1925 -2015)

На протяжении сорока трёх лет (с 1967 по 2010 г.г.) ученым хранителем ГЭВЧ являлся Сергей Борисович Пушкин. Сергей Борисович пользовался признанием и авторитетом в России и за рубежом. Он неоднократно принимал участие в международных конференциях, связанных с измерениями времени и частоты. Им опубликовано около 200 научных трудов, в том числе пять монографий. Он награждён орденом Трудового Красного Знамени (1975). Являлся лауреатом Государственной премии СССР (1983г.), а в 1996 году ему было присвоено почётное звание «Заслуженный метролог Российской Федерации».

## 2. Мероприятия по совершенствованию ГЭВЧ

В период с 2007 по 2011 годы большое значение для развития ГЭВЧ имела Федеральная целевая программа «Глобальная навигационная система» (ФЦП «ГЛОНАСС») [3, 4], в ходе выполнения которой для технического переоснащения эталона были закуплены, созданы и внедрены новейшие средства измерений, приборы и оборудование. ФГУП «ВНИИФТРИ» добился значительного прогресса в части создания и совершенствования средств и методов измерений времени и частоты. На этом этапе своего развития ГЭВЧ был оснащён следующими техническими средствами:

средства воспроизведения единиц времени и частоты – два метрологические цезиевые реперы частоты фонтанного типа (МЦР «Фонтан»), использующие технологии лазерного охлаждения атомов [5] с неисключенной систематической погрешностью воспроизведения единиц времени и частоты не более $5{,}0\cdot10^{-16}$;

средства хранения единиц времени и частоты – восемь стандартов частоты и времени водородных типа Ч1-75А с нестабильностью частоты

выходных сигналов не более $5{,}0 \cdot 10^{-16}$ при интервале времени измерения 1 сут;

комплекс формирования и передачи национальной шкалы времени UTC(SU) в наземный комплекс управления ГЛОНАСС в реальном масштабе времени с погрешностью не более ± 2 нс;

перевозимые квантовые часы водородные модернизированные ПКЧВ-М, обеспечивающие погрешность хранения шкалы времени при времени транспортирования 24 ч не более ±2 нс;

средства внутренних сличений на базе измерителей интервалов времени SR-620 (Stanford Research Systems), компараторов фазовых #10265 (TimeTech); средства формирования рабочих шкал времени на базе цифровых фазовращателей HROG-5 (Spectradynamics);

средства сравнений шкал времени пространственно удаленных объектов на базе аппаратуры дуплексных сличений шкал времени SATRE (TimeTech), а также на базе специализированных двухчастотных многоканальных приемников сигналов ГЛОНАСС/GPS TTS-3 и TTS-4 (PikTime Systems).

Кроме этого, в состав эталона вошёл оптический синтезатор частоты FC1500-250 (Menlo Systems), позволивший расширить диапазон измеряемых частот до $5{,}0 \cdot 10^{14}$.

Эталон был оснащен новым вспомогательным оборудованием, модернизирована его техническая инфраструктура, реконструированы системы электроснабжения, системы прецизионного кондиционирования и мониторинга параметров окружающей среды.

Наряду с модернизацией технических средств были проведены работы по совершенствованию нормативной базы – разработаны комплекты конструкторских и эксплуатационных документов эталона, усовершенствована методика расчёта национальной шкалы времени.

Переоснащение ГЭВЧ новыми техническими средствами позволило перейти к новой стратегии реализации национальной шкалы времени UTC(SU) [6]. Основанная на системном подходе к развитию средств и методов воспроизведения, хранения и передачи единиц времени и частоты и направленная на удовлетворение потребностей государства в точности и оперативности частотно-временной информации, распространяемой ГСВЧ, новая стратегия реализации национальной шкалы времени обеспечила:

независимое формирование национальной шкалы атомного времени TA(SU) на основе единиц времени и частоты, воспроизводимых МЦР «Фонтан» в соответствии с определением секунды в Международной системе единиц СИ;

формирование и передачу национальной шкалы времени UTC(SU) потребителям с заданными характеристиками в реальном масштабе времени;

повышение достоверности и надежности информации о UTC(SU)

вследствие автоматизации технологических процессов формирования, хранения и передачи национальной шкалы времени.

Пятого декабря 2012 года Межведомственная комиссия провела государственные испытания усовершенствованного ГЭВЧ. Комиссия установила, что по своим метрологическим и техническим характеристикам ГЭВЧ не уступает лучшим зарубежным аналогам и отметила высокий научно-технический уровень проведённых мероприятий, в результате которых улучшились метрологические характеристики эталона:

- неисключенная систематическая погрешность воспроизведения единиц времени и частоты снижена на два порядка;
- относительная нестабильность единиц времени и частоты при интервалах времени измерения 10-30 сут снижена в пять раз;
- пределы допускаемых смещений UTC(SU) относительно UTC уменьшены в десять раз.

В результате совершенствования ГЭВЧ вошёл в число лучших мировых эталонов единиц времени и частоты. В табл. 2 представлены основные метрологические характеристики эталона до и после проведения мероприятий по совершенствованию.

Таблица 2

Сравнительные характеристики ГЭТ 1–98 и ГЭТ 1–2012

| Характеристика | ГЭТ 1–98 | ГЭТ 1–2012 |
|---|---|---|
| Относительная неисключенная систематическая погрешность воспроизведения единиц времени и частоты | $\leq 5{,}0 \cdot 10^{-14}$ | $\leq 5{,}0 \cdot 10^{-16}$ |
| Относительная нестабильность единиц времени и частоты при интервалах времени измерения 10–30 сут | $\leq 5{,}0 \cdot 10^{-15}$ | $\leq 1{,}0 \cdot 10^{-15}$ |
| Пределы допускаемых смещений UTC(SU) относительно UTC, нс | ±100 | ±10 |
| Диапазон измеряемых интервалов времени, с | $1{,}0 \cdot 10^{-9}$ — $1{,}0 \cdot 10^{8}$ | $1{,}0 \cdot 10^{-9}$ — $1{,}0 \cdot 10^{8}$ |
| Диапазон измеряемых частот, Гц | 1,0 — $1{,}0 \cdot 10^{14}$ | 1,0 — $5{,}0 \cdot 10^{14}$ |

21 декабря 2012 года коллегия Росстандарта рассмотрела результаты государственных испытаний усовершенствованного ГЭВЧ и приняла решение об его утверждении. Эталон был утверждён приказом руководителя Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 декабря 2012 № 1226 [7] с присвоением ему регистрационного номера ГЭТ 1-2012 и внесён в соответствующий раздел Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений.

В 2012 году разработан проект межгосударственного стандарта ГОСТ 8.129-2013 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений

времени и частоты», который был принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации и введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 июля 2014 года.

## 3. Результаты мониторинга метрологических характеристик составных частей ГЭВЧ

При выполнении одной из основных задач, возложенных на ГМЦ ГСВЧ постановлениями Правительства РФ [8, 9] - обеспечение непрерывного функционирования и развития технических средств и систем Государственной службы времени, мониторинг метрологических характеристик играет важнейшую роль.

Как уже отмечалось, в составе эталона восемь СЧВВ типа Ч1-75А производства ННИПИ «Кварц», а также один СЧВВ производства ЗАО «Время-Ч», которые используются в качестве средств хранения единиц, – это одни из лучших мировых образцов. Нестабильность частоты их выходных сигналов при интервалах времени измерения 1 сут не превышает $5{,}0 \cdot 10^{-16}$ (рис. 3).

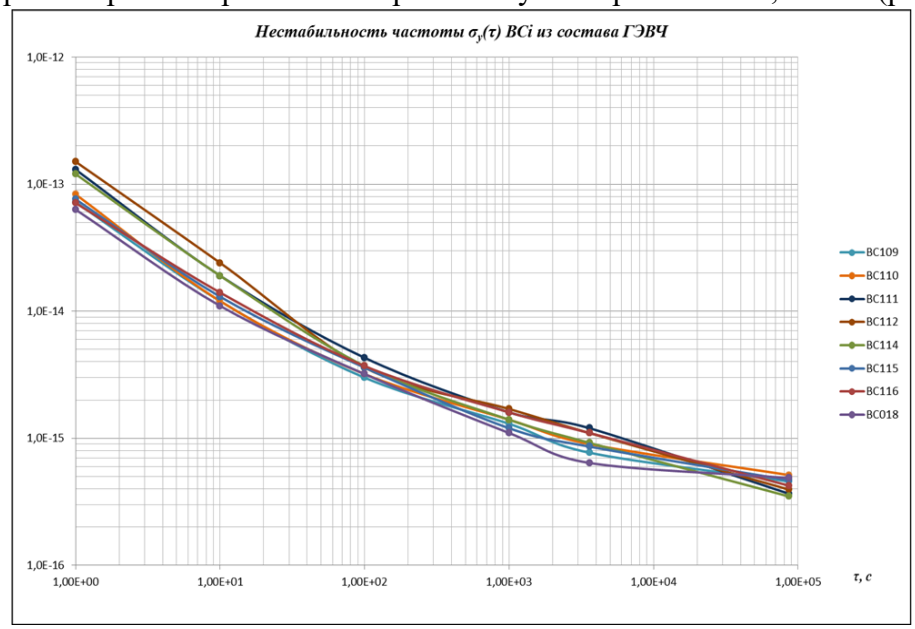



Рис. 3. Нестабильность частоты выходных сигналов СЧВВ из состава ГЭВЧ

В качестве средств формирования рабочих шкал времени в составе ГЭВЧ используются прецизионные цифровые фазовращатели HROG-5, которые формируют физический сигнал, совмещённый с национальной шкалой времени с допускаемым отклонением ± 3 нс. Выходные сигналы комплекса формирования рабочей шкалы используются в качестве опорных для приёмников сигналов ГНСС, для средств контроля передачи сигналов

точного времени Московским телевизионным техническим центром «Останкино», для средств оперативного контроля работы специализированных радиостанций ГСВЧ, а также для NTP серверов ГМЦ ГСВЧ. На рис. 4 представлены смещения рабочей шкалы ГЭВЧ относительно национальной шкалы времени.

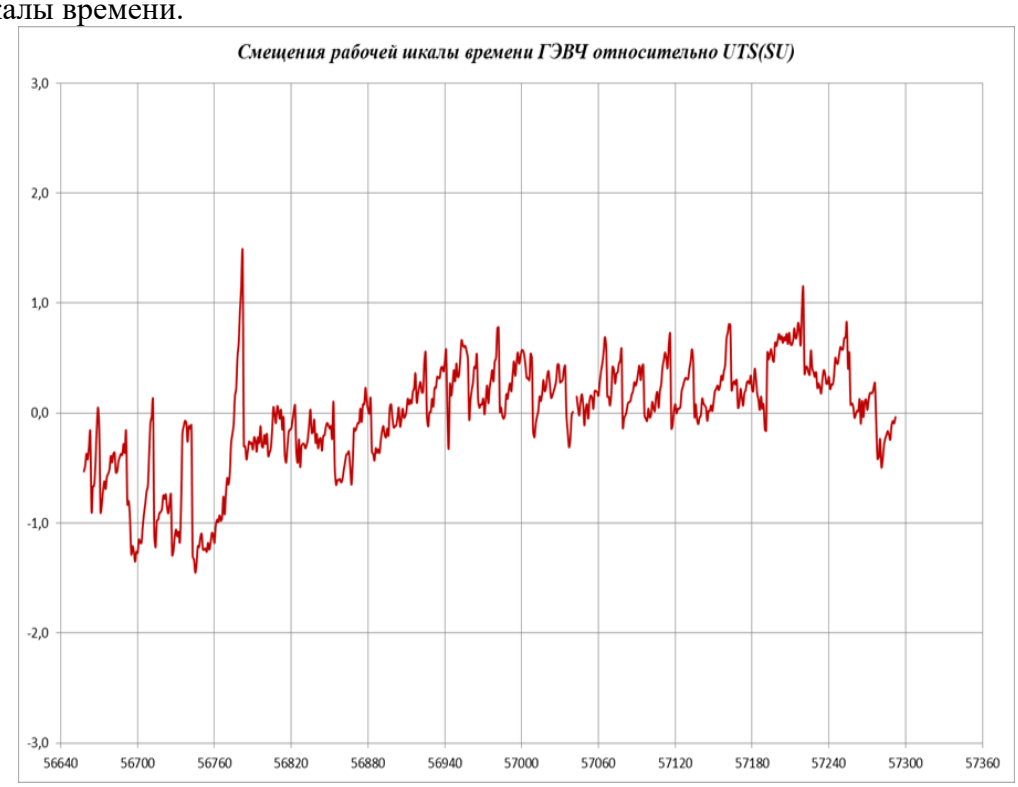



Рис. 4. Смещения рабочей шкалы времени относительно UTC(SU) в 2014-2015 гг.

## 4. ГЭВЧ на уровне лучших зарубежных эталонов

Метрологические характеристики эталона - это его лицо, если хотите, – лицо нашего государства. ГЭВЧ непрерывно участвует в международных ключевых сличениях эталонов CCTF-K001. UTC, которые выполняются на основании Договоренности о взаимном признании национальных измерительных эталонов и сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых национальными метрологическими центрами [10]. Эти сличения в МБМВ осуществляются с 1988 года, а в 2001 году были определены в качестве ключевых сличений MRA CIPM. Измерительная информация ГЭВЧ регулярно представляется в МБМВ, она включает в себя несколько информационных потоков, предназначенных для формирования UTC и UTCr:

- данные о смещениях шкал времени СЧВ из состава ГЭВЧ

относительно национальной шкалы времени UTC(SU);

- данные о смещениях системных шкал времени ГНСС ГЛОНАСС и GPS относительно национальной шкалы времени UTC(SU);
- данные сравнений национальной шкалы времени UTC(SU), полученные с использованием дуплексным методом TWSTFT;
- данные сличений по частоте опорного СЧВ из состава ГЭВЧ относительно первичных цезиевых реперов частоты фонтанного типа.

В ежемесячно публикуемых МБМВ циркулярах серии «Т» приводятся оценки метрологических характеристик для всех участвующих лабораторий (по состоянию на август 2015 года это 74 лаборатории мира). Поэтому характеристики ГЭВЧ представляют Россию в международном метрологическом сообществе. Коллектив ГМЦ ГСВЧ, понимая всю ответственность, обеспечивает поддержание характеристик национального эталона на высочайшем международном уровне.

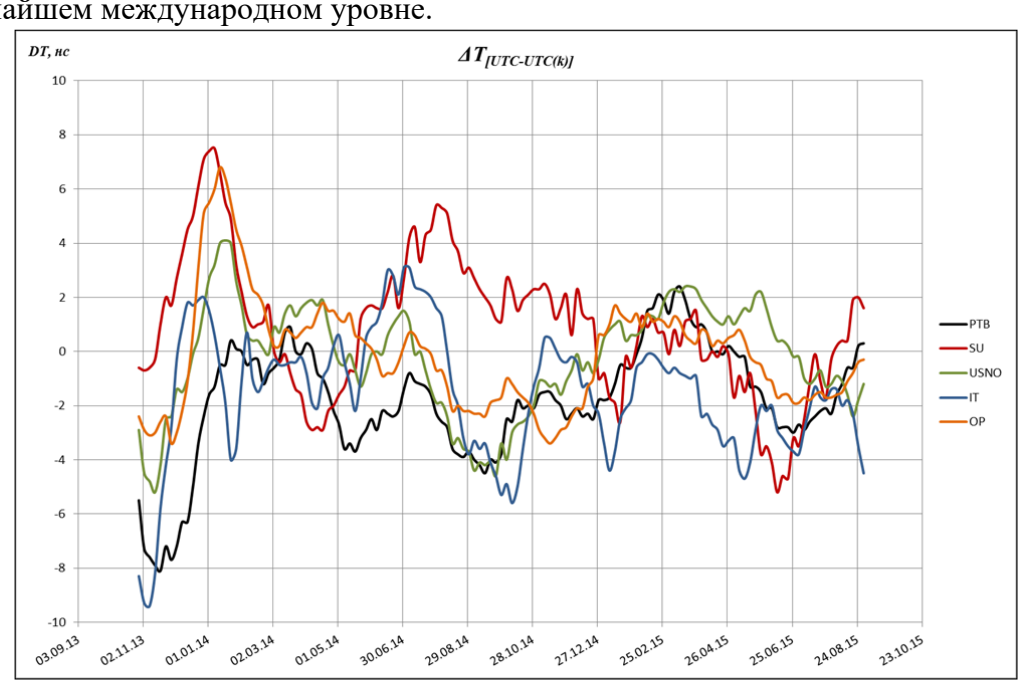



Рис. 5. Смещения шкал координированного времени UTC(k) относительно UTC в 2014-2015 гг.

На рис. 5 представлены сравнительные результаты оценки смещений шкал координированного времени эталонов времени России, Германии, Италии, Франции и США относительно UTC по официальным данным МБМВ, опубликованным в циркулярах «Т» №№ 312-332 [11] в 2014-2015 г.г.

Приведенные сравнительные оценки метрологических характеристик подтверждают, что ГЭВЧ входит в пятёрку ведущих эталонов времени мира.

На рис. 6 представлен внешний вид комплекса внутренних сличений ГЭВЧ, а на рис. 7 – рабочее место поверителя.

Рис. 6. Комплекс внутренних сличений и комплекс формирования рабочих шкал времени из состава ГЭВЧ

Рис. 7. Рабочее место поверителя

## 5. Перспективы развития ГЭВЧ

С целью обеспечения конкурентоспособного развития ГЛОНАСС [12] и достижения заданных тактико-технических характеристик системы на период до 2020 г. предполагается дальнейшее развитие ГЭВЧ в рамках выполнения мероприятий ФЦП «ГЛОНАСС» в следующих направлениях:

модернизация комплексов хранения шкалы UTC(SU) для обеспечения ее согласования с UTC с погрешностью не более ±3 нс;

создание высокоточных средств сравнений UTC(SU) со шкалой времени ГЛОНАСС и другими эталонами времени и частоты;

создание хранителя единиц времени и частоты на основе фонтана атомов рубидия с нестабильностью $(1{,}0\ldots2{,}0)\cdot10^{-16}$ для оснащения эталонов единиц времени и частоты;

создание оптических стандартов частоты с неисключенной систематической погрешностью воспроизведения единиц $1{,}0\cdot10^{-16}$–$1{,}0\cdot10^{-17}$;

создание перевозимых квантовых часов нового поколения, обеспечивающих погрешность хранения шкалы времени не более ±1 нс;

проведение исследований по созданию высокоточного канала передачи эталонных сигналов времени и частоты по волоконно-оптической линии связи.

При этом предполагается, что точность формирования UTC(SU) повысится не менее чем в 3 раза, а точность передачи UTC(SU) ГЛОНАСС – не менее чем в 8 раз. Требования к характеристикам формирования и передачи UTC(SU) до 2020 г. представлены табл. 3.

Таблица 3

Целевые показатели ФЦП «ГЛОНАСС»

| Год | Погрешность согласования | |
|---|---|---|
| | UTC(SU) с UTC, нс | системной шкалы времени ГЛОНАСС с UTC(SU), нс |
| 2012 | ± 10 | ± 120 |
| 2013 | ± 10 | ± 50 |
| 2014 | ± 10 | ± 35 |
| 2015 | ± 7 | ± 25 |
| 2016 | ± 7 | ± 20 |
| 2017 | ± 7 | ± 15 |
| 2018 | ± 5 | ± 10 |
| 2019 | ± 4 | ± 7 |
| 2020 | ± 3 | ± 4 |

Выполнение перечисленных мероприятий по совершенствованию средств воспроизведения, хранения и передачи единиц времени, частоты и национальной шкалы времени создаст техническую основу для дальнейшего конкурентоспособного развития системы ГЛОНАСС в целом, средств ее метрологического обеспечения, а также средств мониторинга характеристик формируемого системой навигационного поля. Будут созданы условия для эффективного применения современных и перспективных комплексов и систем народнохозяйственного, научного и оборонного назначения.

**Литература**

1. Доклад Государственному комитету стандартов Совета Министров СССР. Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени, Менделеево, 1983.
2. Доклад Государственному комитету по стандартизации и метрологии Российской Федерации. Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени, Менделеево, 1998.
3. Постановление Правительства РФ от 20.08.2001 года № 587 «О федеральной целевой программе «Глобальная навигационная система».
4. Постановление Правительства РФ от 12.09.2008 № 680 «О внесении изменений в федеральную целевую программу «Глобальная навигационная система».
5. Domnin Yu. S., Baryshev V. N., Boyko A. I. e. a. The MTsR-F2 fountain-type cesium frequency standard // Measurement Techniques, 2012, № 10, p. 1155–1162.
6. Блинов И. Ю., Домнин Ю. С., Норец И. Б. и др. Новая стратегия реализации национальной шкалы времени UTC(SU) // Метрология времени и пространства: Докл. 6-го Междунар. симп., 17 – 19 сентября 2012, Менделеево, Менделеево: ВНИИФТРИ, 2013.
7. Приказ руководителя Росстандарта от 28.12.2012 № 1226 «Об утверждении Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени».
8. Постановление Правительства РФ от 23.03.2001 № 225 «Об утверждении Положения о Государственной службе времени, частоты и определения параметров вращения Земли».
9. Постановление Правительства РФ от 30.04.2008 г. № 323 «Об утверждении Положения о полномочиях федеральных органов исполнительной власти по поддержанию, развитию и использованию глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС в интересах обеспечения обороны и безопасности государства, социально-экономического развития Российской Федерации и расширения международного сотрудничества, а также в научных целях».
10. Договорённость о взаимном признании национальных измерительных эталонов и сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых национальными метрологическими институтами, Париж, 1999.
11. Circular «T» №,№ 312÷332. BIPM, Time Department, http://www.bipm.org/jsp/en/TimeFtp.
12. Постановление Правительства РФ от 3.03.2012 г. № 189 «Об утверждении ФЦП «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012 - 2020 годы».