

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕРВИЧНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦ ВРЕМЕНИ, ЧАСТОТЫ И НАЦИОНАЛЬНОЙ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ ГЭТ 1-2018

**С.И. Донченко, И.Ю. Блинов, Ю.С. Домнин,
А.С. Гончаров, С.Н. Слюсарев, И.Б. Норец**

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

В статье приведены краткие исторические сведения, описание Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени. Представлены сравнительные оценки метрологических характеристик эталона до и после проведения мероприятий по его совершенствованию. Приведены направления дальнейшего развития и совершенствования эталона.

The article provides brief historical information, a description of the State primary standard of units of time, frequency, and the national time scale. Comparative assessments of the metrological characteristics of the standard before and after improvement measurements are presented. The directions for further development and improvement of the standard are given.

Ключевые слова: Государственный первичный эталон, изменения, время, частота, характеристики, совершенствование, шкала времени.

Key words: State primary standard, changes, time, frequency, characteristics, improvement, time scale.

История развития

Измерения времени и частоты — один из наиболее распространённых и точных видов измерений. Точность воспроизведения единиц времени и частоты, формирования и хранения национальной шкалы времени играет важнейшую роль для стратегических и приоритетных направлений развития Российской Федерации. В Российской Федерации содержатся и применяются восемь вторичных эталонов единиц времени и (или) частоты, более 1500 типов средств измерений времени и частоты внесены в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

Информация о точном значении времени и календарной дате, распространяемая Государственной службой времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ), является обязательной для использования в Российской Федерации [1], она широко используется во всех сферах жизнедеятельности государства, обеспечивает высокоточную синхронизацию во времени множества процессов, имеющих различное применение при создании специализированных прикладных систем различного назначения практически во всех областях экономики.

Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (ГЭТ 1) предназначен для независимого воспроиз-

ведения и хранения единиц времени, частоты и национальной шкалы времени, а также для их передачи в соответствии с требованиями Государственной поверочной схемы, эталон содержится и применяется во ФГУП «ВНИИФТРИ». Впервые он был аттестован и утверждён 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 ГЭТ 1 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.

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». Главный метрологический центр 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. Принципиальным было и то, что специалистами ФГУП «ВНИИФТРИ» был разработан и введён в состав эталона первый метрологический цезиевый репер частоты МЦР-101. С этого момента ГЭТ 1 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.

Переаттестации 1983 года предшествовало несколько серьёзных НИР и ОКР, в результате выполнения которых были разработаны и введены в состав ГЭТ 1 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 телевидению и по сигналам радионавигационных станций. Разработана и введена в эксплуатацию аппаратура сравнения шкал времени по радиометеорным каналам. В состав эталона был введён радио-оптический частотный мост РОЧМ-101, позволивший расширить диапазон измеряемых частот до $1,0 \cdot 10^{14}$ Гц [2].

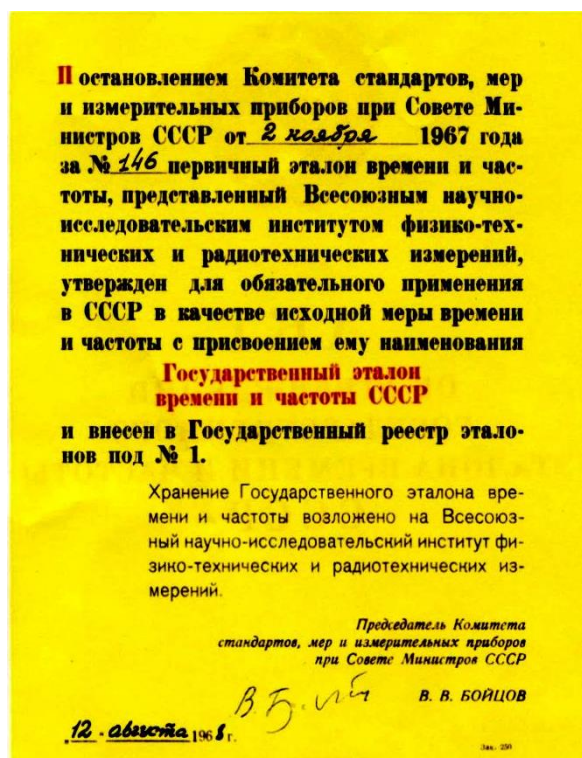


Рис. 1. Акт об утверждении ГЭТ 1 от 12.08.1968 г.

В период с 1984 по 1994 г. к работам по созданию ГЭТ 1 нового поколения были привлечены в качестве соисполнителей такие организации как ФИАН, НИИПИ «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 ГЭТ 1 эксплуатировались 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.

В период с 2007 по 2011 г. огромное влияние на развитие эталона оказала 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 ГЭТ 1 был оснащён следующими техническими средствами:

- средства воспроизведения единиц времени и частоты — два метрологических цезиевых репера частоты фонтанного типа (МЦР «Фонтан»), использующие технологии лазерного охлаждения атомов [5] с неисключённой систематической погрешностью воспроизведения единиц времени и частоты не более $5,0 \cdot 10^{-16}$;
- 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 (*TimeTech*); средства формирования рабочих шкал времени на базе цифровых фазовращателей HROG-5 (*Spectradynamics*);
- средства сравнений шкал времени пространственно удалённых объектов на базе аппаратуры дуплексных сличений шкал времени SATRE (*TimeTech*), а также на базе специализированных двухчастотных многоканальных приёмников 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 $5,0 \cdot 10^{14}$ Гц.

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

Оснащение ГЭТ 1 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 надёжности информации о UTC(SU) вследствие автоматизации технологических процессов формирования, хранения и передачи национальной шкалы времени.

После проведённых мероприятий по совершенствованию, с улучшенными характеристиками эталон был утверждён приказом руководителя Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии [7] с присвоением ему регистрационного номера ГЭТ 1-2012.

Сравнительные характеристики ГЭТ 1 в период с 1967 по 2012 год представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные метрологические характеристики ГЭТ 1
в период с 1967 по 2012 год

Год	Характеристика		
	Относительная неисключённая 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
2012	$5,0 \cdot 10^{-16}$	$1,0 \cdot 10^{-15}$	10 нс

Необходимо отметить, что на протяжении сорока трёх лет (с 1967 по 2010 г.) учёным хранителем ГЭТ 1 являлся Сергей Борисович Пушкин. Сергей Борисович пользовался признанием и авторитетом на Родине 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 (1983 г.), а в 1996 году ему было присвоено почётное звание «Заслуженный метролог Российской Федерации».



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

Непрерывно растущие требования потребителей к точности измерений времени и частоты, развитие и улучшение характеристик СИ времени и частоты влекут за собой необходимость постоянного совершенствования эталонной базы, и в первую очередь — Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (ГЭТ 1). В перспективе ожидается широкий спектр задач навигационного и координатно-временного обеспечения, также требующих дальнейшего совершенствования эталонной базы в целом и ГЭТ 1 в частности.

В первую очередь это относится к высокоточным применениям глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), для реализации которых требуется обеспечение дециметрового и сантиметрового уровней точности в реальном масштабе времени, а также к применениям, связанным с обеспечением безопасности при эксплуатации авиационного, морского и наземного транспорта. Требуется повышение оперативности навигационных решений, устойчивости и точности систем синхронизации, повышения пропускной способности информационно-телекоммуникационных систем. Технологии спутниковой навигации широко востребованы при создании:

- высокоскоростных транспортных средств и интеллектуальных систем управления новыми видами транспорта;
- систем контроля перевозок пассажиров, специальных и опасных грузов;
- аппаратуры высокоточной синхронизации для энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии;
- автоматизированных систем высокоточного управления сельскохозяйственной техникой, мониторинга лесных угодий, мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды;
- систем контроля состояния особо важных объектов и сооружений транспортной инфраструктуры, ядерной энергетики, контроля движения зем-

ной коры, что содействует развитию технологий предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

За последние пять лет ФГУП «ВНИИФТРИ» провёл масштабные мероприятия по совершенствованию эталона, которые включали в себя разработку и оснащение эталона новыми средствами воспроизведения, хранения и передачи единиц времени, частоты и национальной шкалы времени в составе:

- рубидиевые хранители и реперы частоты фонтанного типа с нестабильностью частоты не более $2,0 \cdot 10^{-16}$;
- оптический репер частоты на холодных атомах стронция, с неисключённой систематической погрешностью воспроизведения единиц времени и частоты не более $1,0 \cdot 10^{-16}$;
- эталонный комплекс времени и частоты на основе новейших стандартов частоты и времени водородных активного типа, с суточной нестабильностью частоты не более $3,0 \cdot 10^{-16}$.

Основу комплекса средств воспроизведения единиц в составе эталона по-прежнему составляют два метрологических цезиевых репера частоты фонтанного типа (рис. 3), которые воспроизводят единицы в строгом соответствии с определением секунды. Их принцип работы и анализ бюджета неопределённости измерений при воспроизведении единиц приведены в [8, 9]. Кроме того, в состав комплекса входят рубидиевые реперы частоты фонтанного типа (рис. 4) [10], а также оптический репер частоты на холодных атомах стронция ^{87}Sr [11] (рис. 5).

Комплекс хранения единиц основывается на шестнадцати водородных стандартах частоты и времени активного типа, рубидиевого хранителя частоты фонтанного типа (рис. 6), средств внутренних и внешних сличений. В ходе проведённых мероприятий по совершенствованию его состав дополнен эталонным комплексом времени и частоты на основе новейших стандартов частоты и времени водородных активного типа (рис. 7). На рисунке 8 представлены комплекс внутренних сличений и комплекс формирования шкал времени.

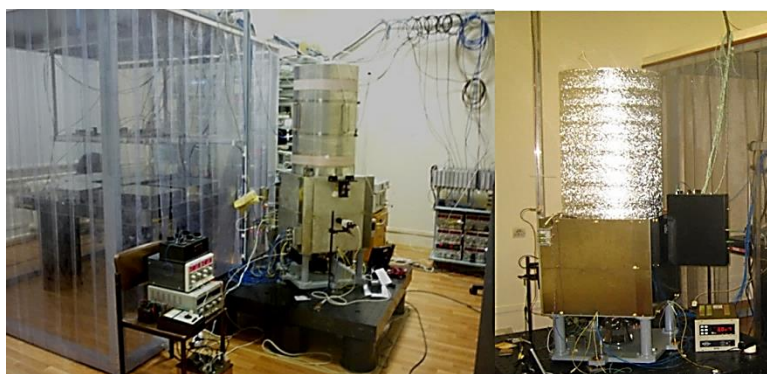


Рис. 3. Цезиевые реперы частоты фонтанного типа CsFO1 и CsFO2

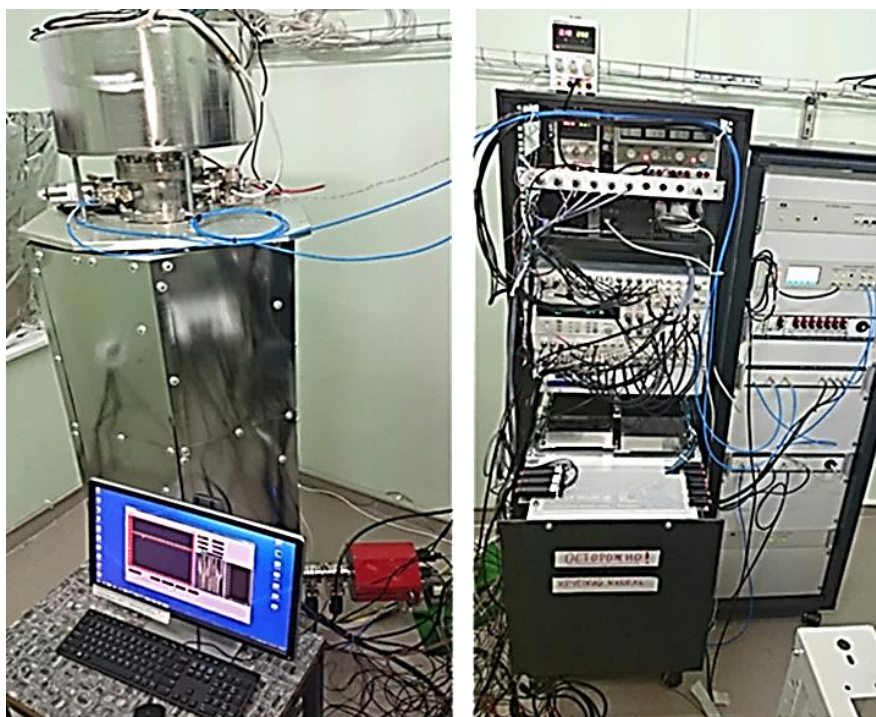


Рис. 4. Комплекс аппаратуры рубидиевых реперов частоты

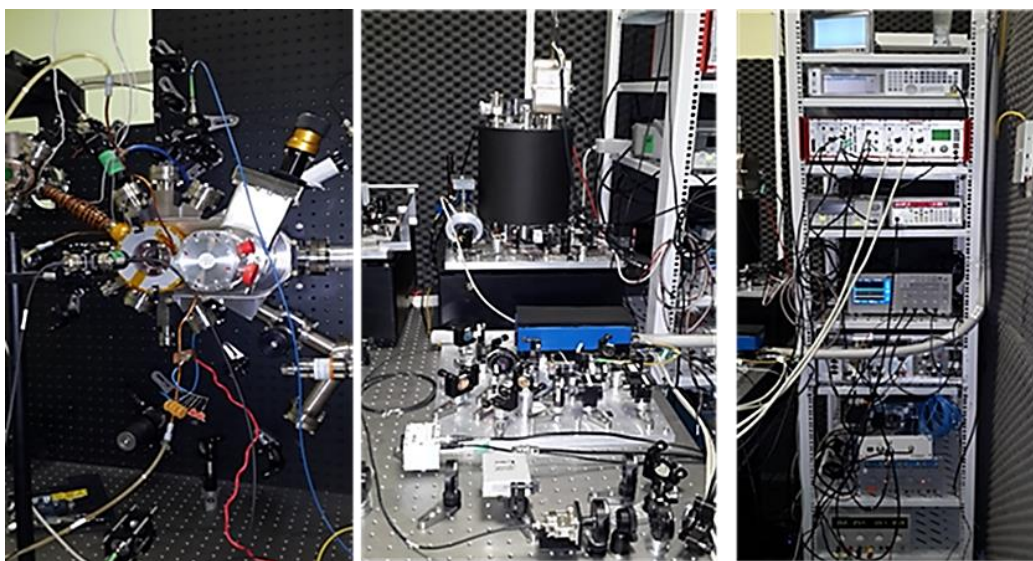


Рис. 5. Оптический репер частоты на холодных атомах стронция ^{87}Sr



Рис. 6. Хранитель единиц времени и частоты на основе «фонтана» атомов рубидия



Рис. 7. Эталонный комплекс времени и частоты

В новом составе и с улучшенными характеристиками (таблица 2) эталон был утверждён приказом руководителя Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии [12] с присвоением ему регистрационного номера ГЭТ 1-2018.



Рис. 8. Комплекс внутренних сличений и комплекс формирования шкал времени

Таблица 2

Сравнительные метрологические и технические характеристики ГЭТ 1
до и после совершенствования

Метрологическая характеристика	ГЭТ 1-2012	ГЭТ 1-2018
Доверительные границы относительной неисключённой систематической погрешности воспроизведения единиц времени и частоты при $P = 0,99$	$\leq 5,0 \cdot 10^{-16}$	$\leq 5,0 \cdot 10^{-16}$
Среднее квадратическое отклонение результатов измерений при воспроизведении единиц времени и частоты при интервале времени измерений 1 сут	$\leq 5,0 \cdot 10^{-15}$	$\leq 1,0 \cdot 10^{-15}$
Относительная нестабильность единиц времени и частоты при интервалах времени измерения 10–30 сут	$\leq 1,0 \cdot 10^{-15}$	$\leq 1,0 \cdot 10^{-15}$
Пределы допускаемых смещений национальной шкалы времени UTC(SU) относительно UTC, нс	± 10	± 7
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	$1,0 - 5,0 \cdot 10^{14}$	$1,0 \cdot 10^{-3} - 5,7 \cdot 10^{14}$

Международные ключевые сличения

ГЭТ 1 непрерывно участвует в международных ключевых сличениях ССТФ-K001.UTC. Национальная шкала времени рассчитывается ежедневно, и ежедневно измерительная информация эталона передается в отделение времени Международного бюро мер и весов (МБМВ), это несколько видов информации, общий объем которой составляет более 400 Мб в год. Таким образом, обеспечивается вклад Российской Федерации в формирование Международных шкал атомного и координированного времени TAI и UTC, а также прослеживаемость национальной шкалы времени UTC(SU) к UTC. В настоящее время свой вклад в формирование TAI и UTC вносят более восьмидесяти национальных лабораторий времени.

Результаты международных ключевых сличений ежемесячно публикуются отделением времени МБМВ в виде циркуляров «Т» [13] и других данных, которые являются исходными для сравнительного анализа метрологических характеристик национальных шкал времени и эталонов, представленного на рисунке 9 и в таблице 3.

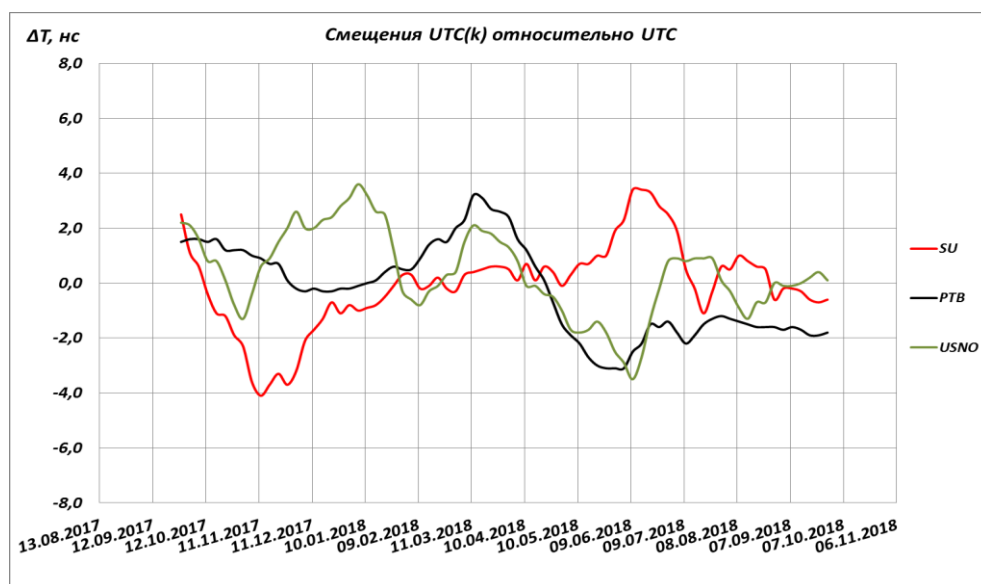


Рис. 9. Сравнительные оценки смещений шкал координированного времени UTC(k) относительно UTC в 2017–2018 гг.

Сравнительные оценки характеристик по официальным данным МБМВ подтверждают, что национальная шкала времени UTC(SU) входит в число лучших реализаций UTC, а также что характеристики средств воспроизведения единиц времени и частоты из состава ГЭТ 1 находятся на уровне ведущих зарубежных эталонов.

Таблица 3

Сравнительные характеристики эталонов

Характеристики национальных эталонов	ВНИИФТРИ, Россия	РТВ, Германия	ОР, Франция	ИТ, Италия
Стандартная неопределённость измерений при воспроизведении единиц времени и частоты	$2,4 \cdot 10^{-16}$	$2,0 \cdot 10^{-16}$	$2,8 \cdot 10^{-16}$	$1,7 \cdot 10^{-16}$

Направления дальнейшего развития и совершенствования эталона

В стратегическом плане развития МБМВ на период 2016–2026 гг. «ССТF Strategy Document» [14] указывается, что в ближайшее десятилетие следует развивать первичные цезиевые стандарты частоты на фонтане холодных атомов, которые на ближайшее десятилетие будут удовлетворять требования потребителей. Вместе с тем будут вестись исследования, направленные на создание стандартов частоты оптического и СВЧ диапазонов с целью замены цезиевого стандарта частоты на более точные стандарты и на последующее переопределение секунды. Таким образом, можно утверждать, что в ближайшее время роль первичного стандарта частоты будет выполнять цезиевый фонтан и в дальнейшем возможно проведение поисковых работ по пути повышения его точности до уровня $1 \cdot 10^{-16}$.

Другим перспективным направлением является исследование по созданию стандартов частоты на фонтане атомов рубидия. В рубидиевом фонтане спин — обменный сдвиг, по крайней мере, на порядок меньше, чем в цезиевом фонтане. Следовательно, можно ожидать, что неисключённая систематическая погрешность воспроизведения единиц стандарта частоты на атомах рубидия может достигать нескольких единиц семнадцатого знака. Наряду с точностью первичных стандартов, оспаривающих наилучшие доступные технологии передачи единиц, важным направлением может стать разработка портативных первичных стандартов. Это позволит подтвердить эффективность новых методов сравнения удалённых стандартов частоты (эталонов).

Анализ материалов других зарубежных публикаций позволяет выделить следующие перспективные направления путей развития средств воспроизведения, хранения и передачи единиц времени, частоты и шкалы времени:

- разработка высокоточных оптических стандартов частоты, в том числе перевозимых;

- разработка малогабаритных атомных стандартов частоты;
- разработка средств передачи эталонных сигналов частоты и времени по оптоволоконному каналу связи.

Дальнейшее развитие ГЭТ 1 запланировано в рамках Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» и будет осуществляться по следующим основным направлениям:

- модернизация комплекса хранения национальной шкалы времени для обеспечения согласования национальной шкалы времени UTC(SU) с UTC с погрешностью не более ± 3 нс;
- совершенствование средств и методов сравнения шкал времени территориально удалённых эталонов, разработка высокоточных средств сличений национальной шкалы координированного времени UTC(SU) со шкалой времени системы ГЛОНАСС и другими лабораториями времени;
- совершенствование средств воспроизведения и хранения единиц времени и частоты в интересах достижения тактико-технических характеристик системы ГЛОНАСС на 2020 г.

В результате выполнения данных работ предполагается, что точность формирования национальной шкалы времени к 2020 году повысится до ± 3 нс (таблица 4).

Таблица 4

Требования ФЦП «ГЛОНАСС» к характеристикам формирования национальной шкалы времени UTC(SU)

Погрешность согласования национальной шкалы времени с Международной шкалой координированного времени, нс	Год		
	2018	2019	2020
	± 5	± 4	± 3

Заключение

За последние пять лет разработаны и введены в состав ГЭТ 1 новые средства воспроизведения, хранения и передачи единиц времени и частоты. Метрологические характеристики эталона сопоставимы с лучшими зарубежными аналогами и соответствуют современным требованиям потребителей к точности информации о точном значении времени и календарной дате. ГЭТ 1-2018 непрерывно участвует в международных ключевых сличениях, обеспечивая вклад Российской Федерации в формирование международных шкал времени TAI и UTC.

В целях обеспечения конкурентоспособности, для создания опережающего научно-технического задела, а также для удовлетворения перспективных

требований потребителей, дальнейшее развитие ГЭТ 1 запланировано с учётом анализа международного опыта и мировых тенденций развития средств воспроизведения единиц времени и частоты, средств хранения, формирования и передачи единиц и шкал времени.

Литература

1. Постановление Правительства РФ от 23 марта 2001 г. № 225 «Об утверждении Положения о Государственной службе времени, частоты и определения параметров вращения Земли».
2. Доклад Государственному комитету стандартов Совета Министров СССР, Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени. Менделеево, 1983.
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. et al. The MTsR-F2 fountain-type cesium frequency standard // *Measurement Techniques*. 2012. N. 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: ВНИИФТРИ, 2013.
7. Приказ руководителя Росстандарта от 28.12.2012 № 1226 «Об утверждении Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени».
8. Домнин Ю., Барышев В., Бойко А., Елкин Г., Новоселов А., Копылов Л., Купалов Д. Цезиевый репер частоты фонтанного типа МЦР-Ф2 // *Измерительная техника*. 2012. № 10.
9. Блинов И.Ю., Бойко А.И., Домнин Ю.С., Костромин В.П., Купалова О.В., Бюджет неопределённости цезиевого репера частоты фонтанного типа // *Измерительная техника*. 2017. № 1. С. 23–27.
10. Blinov I., Boiko A., Kosheliaevskii N., Kupalova O., Sokolova O. First Experiments on Application of Rb Fountain Frequency Standards for TA (SU) Time Scale Maintenance // *European Frequency and Time Forum (EFTF)*. 2018. P. 257–262.
11. Бердасов О.И., Сутырин Д.В., Стрелкин С.А., Грибов А.Ю., Белотелов Г.С., Костин А.С., Колачевский Н.Н., Слюсарев С.Н. О продолжительности непрерывной работы оптического стандарта частоты на атомах стронция // *Квантовая электроника*. 2018. 48:5. С. 431–437.

12. Приказ руководителя Росстандарта от 02.04.2018 № 600 «Об утверждении Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени».
13. Circular «Т» № 354–370. BIPM, Time Department [Electronic resource]. URL: <https://www.bipm.org>.
14. CCTF Strategy Document: Version 0.6 May 2016 [Electronic resource]. URL: <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/CCTF-strategy-document.pdf>.