

**РЕЗУЛЬТАТЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА
ЕДИНИЦ ВРЕМЕНИ, ЧАСТОТЫ И НАЦИОНАЛЬНОЙ
ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ ГЭТ 1**

И.Б. Норец, Ю.Ф. Смирнов, Е.Ю. Глазов, В.Н. Федотов

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

Аннотация. В статье приведены краткие исторические сведения, описание Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени после проведения мероприятий по его совершенствованию, проведенных в 2021 году. Представлены сравнительные оценки метрологических характеристик эталона. Приведены направления дальнейшего развития и совершенствования эталона.

Ключевые слова: государственный первичный эталон, национальная шкала времени.

**RESULTS OF IMPROVEMENT OF THE STATE PRIMARY
STANDARD OF UNITS OF TIME, FREQUENCY
AND THE NATIONAL TIME SCALE GET 1**

I.B. Norets, Yu.F. Smirnov, E.Y. Glazov, V.N. Fedotov

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
norets_igor@vniiftri.ru*

Abstract. The article provides brief historical information, a description of the State Primary Standard of the Units of Time, Frequency, and the National Time Scale after the measures to improve it carried out in 2021. Comparative estimates of the metrological characteristics of the standard are presented. The directions of further development and improvement of the standard are given.

Keywords: state primary standard, national time scale.

История развития

Впервые Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (далее — ГЭТ 1) был утверждён постановлением Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР от 02.11.1967 г. № 146. Эталон предназначен для независимого воспроизведения и хранения единиц времени, частоты и национальной шкалы времени, а также для их передачи в соответствии с требованиями Государственной поверочной схемы; содержится и применяется во ФГУП «ВНИИФТРИ».

Средства измерений времени и частоты широко применяются в науке и технике, это один из самых массовых видов измерений. Измерения частоты выполняются с наибольшей точностью по сравнению с другими видами радиоизмерений, поэтому многие физические величины преобразуют во временные или частотные для последующего более точного измерения.

Количество типов средств измерений времени и частоты, включённых в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений, — более 1700, в Российской Федерации содержатся и применяются 7 вторичных эталонов единиц времени и (или) частоты, более 100 000 рабочих эталонов, совокупное количество средств измерений, прослеживаемых к ГЭТ 1, — более 50 млн.

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.

Потребителями частотно-временной информации являются: космические навигационные и геодезические системы; космические системы связи; транспорт, в том числе беспилотный; системы управления движением; высокоскоростные системы связи и передачи данных; системы учёта расхода и транспортировки жидкостей и газов; системы коммерческого учёта электроэнергии; банковская сфера; медицина и многие другие.

Постоянно растущий рост требований к точности измерений времени и частоты, а также к оперативности получения частотно-временной информации со стороны потребителей привёл к необходимости непрерывно вести исследования и разработку новой более точной аппаратуры, которая внедрялась в состав эталона в ходе проведения мероприятий (работ) по его совершенствованию.

С 1967 по 1976 год был проведён большой комплекс работ по модернизации эталона. 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. В состав эталона вошли перевозимые квантовые часы, в 1975 году в состав эталона был введён первый метрологический цезиевый репер частоты МЦР-101.

В период до 1983 года 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 радиооптический частотный мост РОЧМ-101, позволивший расширить диапазон измеряемых частот до $1,0 \cdot 10^{14}$ Гц [2].

С 1984 по 1998 г. в состав эталона были включены новые ЭКВЧ «Чайка-Квант», модернизирован МЦР-102, обновлён парк стандартов частоты и времени водородных (СЧВВ). В состав ГЭТ 1 входили шесть 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. Постановлением Госстандарта России от 4 марта 1998 года № 9 ГЭВЧ был утверждён с новыми характеристиками.

В период с 2007 по 2011 г. непосредственное влияние на развитие эталона оказали мероприятия Федеральной целевой программы [3, 4], в ходе выполнения которой для технического переоснащения эталона были созданы и внедрены новейшие средства измерений, приборы и оборудование. ГЭТ 1 был оснащён следующими техническими средствами:

- средствами 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 $5,0 \cdot 10^{-16}$;
- средствами хранения единиц времени и частоты — восемь стандартов частоты и времени водородных типа Ч1-75А с автономной настройкой резонатора и нестабильностью частоты выходных сигналов не более $5,0 \cdot 10^{-16}$ при интервале времени измерения 1 сут.;
- комплексом формирования и передачи национальной шкалы времени UTC (SU) в наземный комплекс управления ГЛОНАСС в реальном масштабе времени с погрешностью не более ± 2 нс;
- перевозимыми квантовыми часами водородными модернизированными ПКЧВ-М, обеспечивающими погрешность хранения шкалы времени при времени транспортирования 24 ч не более ± 2 нс.

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 новыми средствами внутренних и внешних сличений, вспомогательным оборудованием, была модернизирована его техническая инфраструктура, были реконструированы системы электроснабжения, системы 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].

В период с 2018 по 2020 год в рамках Федеральной целевой программы [3, 4], а также Государственной программы Российской Федерации [7] был завершён ряд ОКР по разработке и изготовлению новых средств воспроизведения, хранения и передачи единиц времени и частоты, предназначенных для включения в состав Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1 и улучшения его метрологических характеристик:

- комплекса средств воспроизведения и хранения единиц времени и частоты на основе оптических реперов частоты с неисключённой систематической погрешностью (НСП) воспроизведения единицы частоты в оптическом диапазоне не более $1,0 \cdot 10^{-17}$;
- комплекса хранения национальной шкалы времени ГЭТ 1 на основе шести новейших водородных стандартов частоты активного типа с уникальной суточной нестабильностью не более $3,0 \cdot 10^{-16}$;
- репера частоты фонтанного типа на основе холодных атомов рубидия с НСП воспроизведения единицы частоты не более $2,0 \cdot 10^{-16}$;
- комплекса высокоточных средств сравнений национальной шкалы координированного времени UTC (SU) со шкалой времени системы ГЛОНАСС с нормированной погрешностью сравнения удалённых шкал времени в пределах $\pm 1,5$ нс.

Данный этап развития завершился проведением в 2021 году очередных мероприятий по совершенствованию, включением в состав эталона разработанных технических средств. Приказом Росстандарта [8] эталон был утверждён в новом составе с улучшенными метрологическими характеристиками и с присвоением ему регистрационного номера ГЭТ 1-2022.

Основные этапы совершенствования и сравнительные метрологические характеристики ГЭТ 1 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Год	S_0	Θ_0	ΔT
1975	$3,0 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	$\pm(2-5)$ мкс
1977	$1,0 \cdot 10^{-13}$	$1,0 \cdot 10^{-12}$	± 2 мкс
1983	$5,0 \cdot 10^{-14}$	$2,0 \cdot 10^{-13}$	± 1 мкс
1998	$1,0 \cdot 10^{-14}$	$5,0 \cdot 10^{-14}$	± 20 нс
2012	$5,0 \cdot 10^{-15}$	$5,0 \cdot 10^{-16}$	± 10 нс

Продолжение таблицы 1

Год	S_0	Θ_0	ΔT
2018	$1,0 \cdot 10^{-15}$	$5,0 \cdot 10^{-16}/$ $1,0 \cdot 10^{-16*}$	± 7 нс
2022	$1,0 \cdot 10^{-15}$	$5,0 \cdot 10^{-16}/$ $1,0 \cdot 10^{-17*}$	± 3 нс

где S_0 — относительное среднее квадратическое отклонение при воспроизведении единиц времени и частоты; Θ_0 — относительная неисключённая систематическая погрешность воспроизведения единиц (* — в оптическом диапазоне); ΔT — пределы допускаемых смещений национальной шкалы времени относительно шкалы Всемирного координированного времени

Состав эталона

Основу комплекса средств воспроизведения единиц в составе эталона по-прежнему составляют два метрологических цезиевых репера частоты фонтанного типа (рис. 1), которые воспроизводят единицы в строгом соответствии с определением секунды. Их принцип работы и анализ бюджета неопределённости измерений при воспроизведении единиц приведены в [9, 10]. Кроме того, в состав комплекса входит репер частоты на основе холодных атомов ^{87}Rb и три оптических репера частоты на холодных атомах стронция ^{87}Sr (два из них — в составе комплекса средств воспроизведения и хранения единиц времени и частоты) [11].



Рис. 1. Структурная схема комплекса воспроизведения единиц времени и частоты

Как уже отмечалось, с 1975 года, когда во ФГУП «ВНИИФТРИ» был разработан и введён в состав ГЭТ 1 первый метрологический цезиевый репер частоты МЦР 101, эталон воспроизводит единицы в соответствии с определением секунды в Международной системе единиц (СИ), которое было принято в 1967 году на 13-й Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ). В дальнейшем это определение несколько раз уточнялось и в 2018 году, в результате пересмотра Международной системы единиц, на 26-й ГКМВ приобрело следующую форму [12]:

Секунда, обозначение s (s), есть единица времени в SI. Она определяется путём принятия фиксированного числового значения частоты перехода сверхтонкого расщепления невозмущённого основного состояния атома цезия-133 $\Delta\nu_{Cs}$ равным 9 192 631 770 при выражении в единице Гц, что соответствует s^{-1} .

Это определение означает точное соотношение $\Delta\nu_{Cs} = 9\,192\,631\,770$ Гц. Обратное отношение даёт точное выражение для единицы «секунда» через определяющую константу $\Delta\nu_{Cs}$:

$$1\text{ Hz} = \frac{\Delta\nu_{Cs}}{9\,192\,631\,770} \text{ или } 1\text{ s} = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{Cs}}.$$

Следствием из этого определения является то, что секунда равна продолжительности 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу ими между двумя уровнями невозмущённого основного состояния атома цезия-133.

Необходимо отметить, что в составе ГЭТ 1 в настоящее время есть первичные стандарты, которые воспроизводят единицы в строгом соответствии с определением секунды, а также реперы частоты на основе излучений, подтверждённых Международным комитетом по мерам и весам (МКМВ) как вторичное представление секунды [13], а именно: 9 192 631 770 Гц (^{133}Cs); 6 834 682 610 Гц (^{87}Rb) и 429 228 004 229 873 Гц (^{87}Sr).

Внешний вид составных частей комплекса представлен на рис. 2–4.

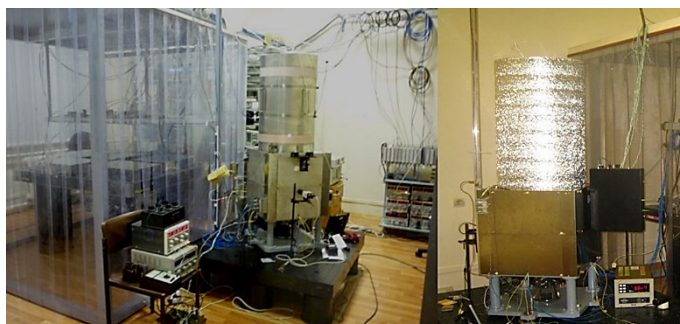


Рис. 2. Цезиевые реперы частоты фонтанного типа CsFO1 и CsFO2

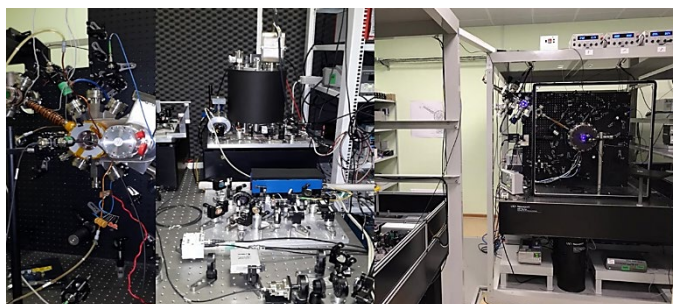


Рис. 3. Оптические реперы частоты на холодных атомах стронция ^{87}Sr



Рис. 4. Репер частоты фонтанного типа на основе холодных атомов ^{87}Rb

Комплекс хранения единиц основывается на двух рубидиевых реперах и двух рубидиевых хранителях частоты фонтанного типа (рис. 5, 6). В ходе проведённых мероприятий по совершенствованию в состав эталона включён комплекс хранения национальной шкалы времени на основе шести новейших стандартов частоты и времени водородных активного типа (рис. 7) с суточной нестабильностью $3,0 \cdot 10^{-16}$.

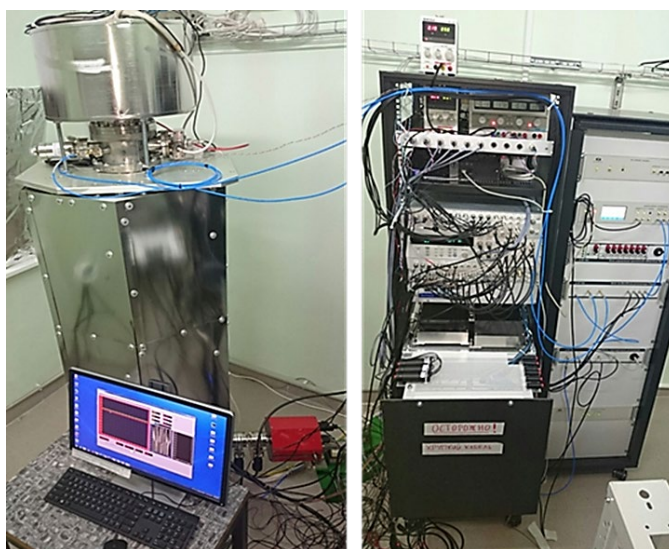


Рис. 5. Комплекс аппаратуры рубидиевых реперов частоты



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



Рис. 7. Комплекс хранения национальной шкалы времени

Всего в состав эталона входят восемнадцать водородных стандартов частоты и времени активного типа, сведения о них приведены в таблице 2. На рис. 8 представлены комплекс внутренних сличений и комплекс формирования шкал времени.

Таблица 2

№ п/п	Тип СЧВВ	Нестабильность частоты выходных сигналов	Количество в составе ГЭТ 1
1	Ч1-75А	$\sigma_y(1 \text{ сут.}) \leq 5,0 \cdot 10^{-16}$	7 комплектов
2	ЯКУР.411141.036	$\sigma_y(1 \text{ с}) \leq 7,0 \cdot 10^{-14}$	4 комплекта
3	ЯКУР.411141.037	$\sigma_y(1 \text{ сут.}) \leq 3,0 \cdot 10^{-16}$	6 комплектов
4	Ч1-1035	$\sigma_y(1 \text{ с}) \leq 7,0 \cdot 10^{-14}$	1 комплект



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

Включение в состав эталона новых технических средств позволило значительно улучшить его характеристики. В результате совершенствования эталона на порядок уменьшены доверительные границы НСП воспроизведения единиц в оптическом диапазоне, в два раза уменьшена относительная нестабильность частоты эталона, более чем в два раза уменьшены пределы допускаемых смещений национальной шкалы времени относительно UTC. Основные метрологические и технические характеристики ГЭТ 1 до и после совершенствования приведены в таблице 3.

Таблица 3

Наименование МХ	ГЭТ 1-2018	ГЭТ 1-2022
Номинальное значение частоты, при котором воспроизводятся единицы времени и частоты, Гц	9192631770	9192631770
Среднее квадратическое отклонение результатов измерений при воспроизведении единиц времени и частоты на интервале времени наблюдений 1 сут., не более	$1,0 \cdot 10^{-15}$	$1,0 \cdot 10^{-15}$

Продолжение таблицы 3

Наименование МХ	ГЭТ 1-2018	ГЭТ 1-2022
Доверительные границы неисклѐченной систематической погрешности воспроизведения единиц времени и частоты при $P = 0,99$	$\pm 5,0 \cdot 10^{-16}$	$\pm 5,0 \cdot 10^{-16}$
Относительная нестабильность частоты эталона (СКДО) при интервалах времени измерения от 10 до 30 сут., интервале времени наблюдений 1 год, не более	$1,0 \cdot 10^{-15}$	$5,0 \cdot 10^{-16}$
Доверительные границы относительной неисклѐченной систематической погрешности воспроизведения единиц в оптическом диапазоне (в диапазоне частот от $1,2 \cdot 10^{14}$ до $5,7 \cdot 10^{14}$ Гц) при уровне доверительной вероятности 0,99	$1,0 \cdot 10^{-16}$	$1,0 \cdot 10^{-17}$
Пределы допускаемых смещений национальной шкалы времени UTC (SU) относительно шкалы всемирного координированного времени UTC, нс	± 7	± 3

Результаты сравнения с зарубежными эталонами времени и частоты

Особенностью ГЭТ 1 является то, что он непрерывно участвует в Международных ключевых сличениях CCTF-K001.UTC. Национальная шкала времени рассчитывается ежедневно, и ежедневно измерительная информация эталона передаётся в отделение времени Международного бюро мер и весов (МБМВ); это несколько видов информации, общий объѐм которой составляет до 1 Гб в год. Таким образом обеспечивается вклад Российской Федерации в формирование Международной шкалы атомного времени ТАИ и шкалы всемирного координированного времени UTC, а также достигается прослеживаемость национальной шкалы времени UTC (SU) к UTC.

Результаты Международных ключевых сличений ежемесячно публикуются отделением времени МБМВ в виде циркуляров «Т» [14] и других данных, которые являются исходными для сравнительного анализа метрологических характеристик национальных шкал времени и эталонов. В настоящее время свой вклад в формирование ТАИ и UTC вносят более восьмидесяти национальных лабораторий времени. По публикуемым отделением времени и частоты МБМВ данным можно сделать вывод, что национальная шкала времени UTC (SU) по своим характеристикам входит в число лучших реализаций UTC (рис. 9), а национальная шкала атомного времени ТА (SU) по характеристикам нестабильности занимает лидирующие позиции среди ведущих зарубежных лабораторий времени (рис. 10).

В таблице 4 представлены сравнительные характеристики средств воспроизведения единиц с применением цезиевых реперов частоты из состава ГЭТ 1 и зарубежных эталонов [15].

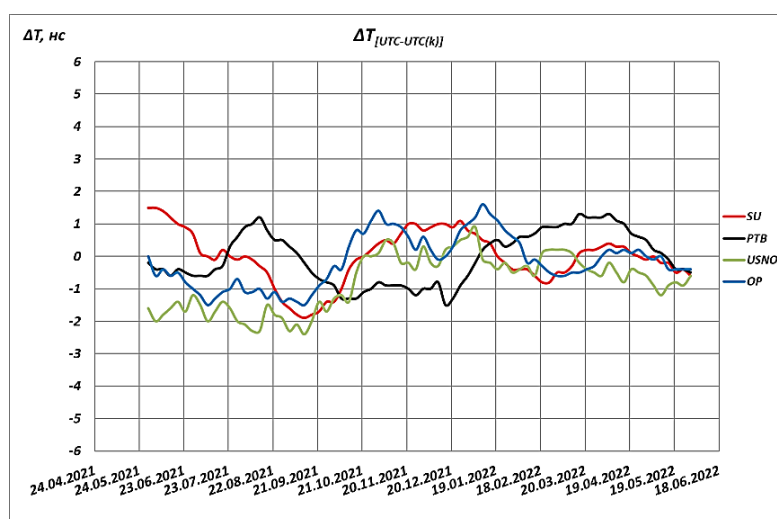


Рис. 9. Сравнительные оценки смещений шкал координированного времени UTC (к) относительно UTC в 2021–2022 гг.

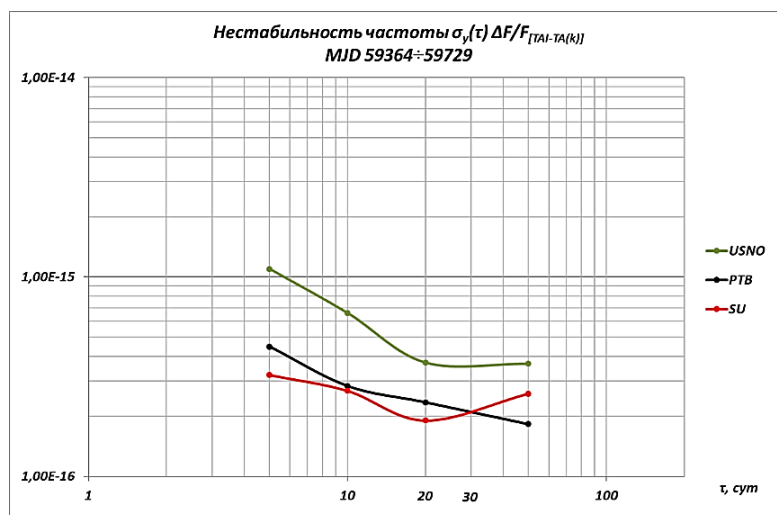


Рис. 10. Сравнительные оценки нестабильности частоты ТА (к) относительно ТАИ при интервале времени наблюдений 1 год

Таблица 4

Характеристики национальных эталонов	ВНИИФТРИ, Россия	PTB, Германия	SYRTE, Франция	IT, Италия
Стандартная неопределённость измерений при воспроизведении единиц времени и частоты	$2,2 \cdot 10^{-16}$	$1,7 \cdot 10^{-16}$	$2,1...2,3 \cdot 10^{-16}$	$1,7...3,6 \cdot 10^{-16}$

Направления дальнейшего развития и совершенствования эталона

В стратегическом плане развития Консультативного комитета по времени и частоте на период 2016–2026 гг. «CCTF Strategy Document» [16] 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 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 транспортируемых;
- разработка малогабаритных атомных стандартов частоты;
- разработка средств передачи эталонных сигналов частоты и времени по оптоволоконному каналу связи.

Дальнейшее развитие ГЭТ 1 предполагает основные разработки:

- оптических реперов частоты с НСП воспроизведения единицы не более $5,0 \cdot 10^{-18}$ и $3,0 \cdot 10^{-18}$ в 2025 и 2030 г. соответственно;
- метрологического цезиевого репера частоты фонтанного типа с НСП воспроизведения единицы частоты не более $3,0 \cdot 10^{-16}$;
- реперов частоты фонтанного типа на холодных атомах рубидия с нестабильностью частоты выходных сигналов не более $2,0 \cdot 10^{-16}$ при интервале времени измерения 10 сут.;
- водородных стандартов времени и частоты с нестабильностью частоты выходных высокочастотных сигналов при интервале времени измерения 1 сут. не более $1,5 \cdot 10^{-16}$;
- транспортируемого оптического стандарта частоты с НСП воспроизведения единицы частоты не более $1,0 \cdot 10^{-17}$.

Заключение

За последние годы 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 1-2022 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.

Список литературы

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 г. № 587 «О федеральной целевой программе «Глобальная навигационная система».
4. Постановление Правительства РФ от 12.09.2008 г. № 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. — No. 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: доклады 6-го Международного симпозиума, 17–19 сентября 2012*, Менделеево. — Менделеево: ВНИИФТРИ, 2013.
7. Постановление Правительства РФ от 15.04.2014 г. № 328 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности».
8. Приказ Росстандарта от 16.02.2022 г. № 382 «Об утверждении Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени».

9. 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. — С. 26–30.
10. 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.
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. Брошюра SI / Пер. с англ. А.Б. Дятлева, Е.П. Зингера, Е.Ю. Корзинина, Е.И. Лунёвой, Л.К. Исаева, М.И. Калинина; Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — МБМВ, 2019.
13. Recommended values of standard frequencies // Bureau international des poids et mesures, BIPM. — URL: <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies>
14. BIPM Time Department FTP server // Bureau international des poids et mesures, BIPM. — URL: <https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/other-products/tailab/>.
<https://www.bipm.org/en/time-ftp/circular-t>.
15. BIPM Annual Report on Time Activities // Bureau international des poids et mesures — Volume 15. — 2020. — URL: https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/annual-reports/bipm-annual-report/annual_report_2020.pdf.
16. CCTF Strategy Document: version 0.6 May 2016. — URL: <https://www.bipm.org/utis/en/pdf/CCTF-strategy-document.pdf>.

Статья поступила в редакцию: 28.06.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 05.06.2022 г.

Статья принята в работу: 25.07.2022 г.