

Государственная служба времени и частоты России

УДК 006.92:521.9

**ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ГОСУДАРСТВЕННОЙ СЛУЖБЫ
ВРЕМЕНИ, ЧАСТОТЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И
ЗА ЕЁ ПРЕДЕЛАМИ****В.Г. Пальчиков**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

palchikov@vniiftri.ru

В статье приводятся правовые и законодательные основы деятельности Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ), основные направления деятельности, состав технических средств и эталонной базы, а также перспективы развития ГСВЧ.

Regulatory and legal framework of the State service for time, frequency and determination of the parameters of the Earth's rotation (GSVCh), main activities, a composition of technical means, standards and also development prospects of GSVCh are described in this article.

Ключевые слова: ГСВЧ, Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (ГЭВЧ), национальная шкала атомного времени TA(SU), национальная шкала времени UTC(SU), метрологический цезиевый репер частоты (МЦР), параметры вращения Земли, международная деятельность

Введение

Государственная служба времени нашей страны начала создаваться в декабре 1920 г., когда Пулковская обсерватория организовала первые передачи сигналов точного времени (один сеанс в сутки через Петроградскую станцию «Новая Голландия»), с которой она была связана прямыми телеграфными линиями.

Постановление Совнаркома СССР от 24 июня 1924 г. об образовании при Главной российской обсерватории в Пулкове Комитета службы времени для организации сети служб времени и выработки мероприятий по распространению точного времени (астрономического) на территории СССР определило развитие службы времени на два ближайших десятилетия.

Важнейший новый этап в развитии Государственной службы времени начался в 1947 г., когда Постановлением Совета Министров СССР была утверждена Межведомственная комиссия единой службы времени при Комитете по делам мер и измерительных приборов при СМ СССР. При ней в качестве ее рабочего органа было организовано Центральное научно-исследовательское бюро единой службы времени (ЦНИБ). На Государственную службу времени возлагались задачи обеспечения страны не только сигналами точного времени, но и сигналами образцовых частот. Главной задачей, поставленной перед Государственной службой времени, было обеспечение всех потребителей страны, включая потребителей сферы обороны, сигналами точного времени и эталонных частот.

Деятельность Межведомственной комиссии ЦНИБ способствовала развитию и централизации Государственной службы времени, частоты и опреде-

ления параметров вращения Земли (ГСВЧ)*, расширению сети передающих станций, широкому внедрению радиоэлектронной аппаратуры. Именно с этого времени начинается интенсивное развитие Государственной службы времени нашей страны.

В настоящее время ГСВЧ является постоянно функционирующей системой технических средств и организаций ряда федеральных органов исполнительной власти, объединенных общей деятельностью по обеспечению потребностей государства в эталонных сигналах частоты и времени (ЭСЧВ), а также в информации о параметрах вращения Земли (ПВЗ) и о точном значении московского времени и календарной дате.

Информация о ПВЗ, о точном значении московского времени и календарной дате, эталонных сигналах частоты и времени, распространяемых ГСВЧ, формируется на основе национальной шкалы времени, является официальной, общедоступной и обязательной для использования в Российской Федерации.

Руководство ГСВЧ осуществляет Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт), деятельность службы регламентируется «Положением о Государственной службе времени, частоты и определения параметров вращения Земли», утвержденным Постановлением Правительства от 23.03.2001 г. № 225. В соответствии с этим документом в состав ГСВЧ входят следующие федеральные органы исполнительной власти и организации (рис. 1):

- Министерство промышленности и торговли Российской Федерации;
- Министерство обороны Российской Федерации;
- Министерство связи и массовых коммуникаций Российской Федерации;
- Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий;
- Министерство образования и науки Российской Федерации;
- Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (руководство ГСВЧ);
- Федеральное агентство по печати и массовым коммуникациям;
- Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии;
- Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды;
- Федеральное космическое агентство;
- Российская академия наук.

*Здесь и далее по тексту статьи под ГСВЧ подразумевается ее современное определение - Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли.

Информацию о точном значении московского времени и календарной дате распространяет Главный метрологический центр службы времени (ГМЦ ГСВЧ), находящийся в ФГУП «ВНИИФТРИ». Эталонные сигналы времени передаются с использованием глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС и спутниковых систем связи (в части передачи сигналов времени), радиосвязи (включая специализированные радиостанции), радиовещания и телевидения, в том числе спутникового. Все эти системы передачи тоже требуют высокоточной синхронизации с национальной шкалой времени РФ. В наибольшей степени это относится к спутниковым навигационным системам.

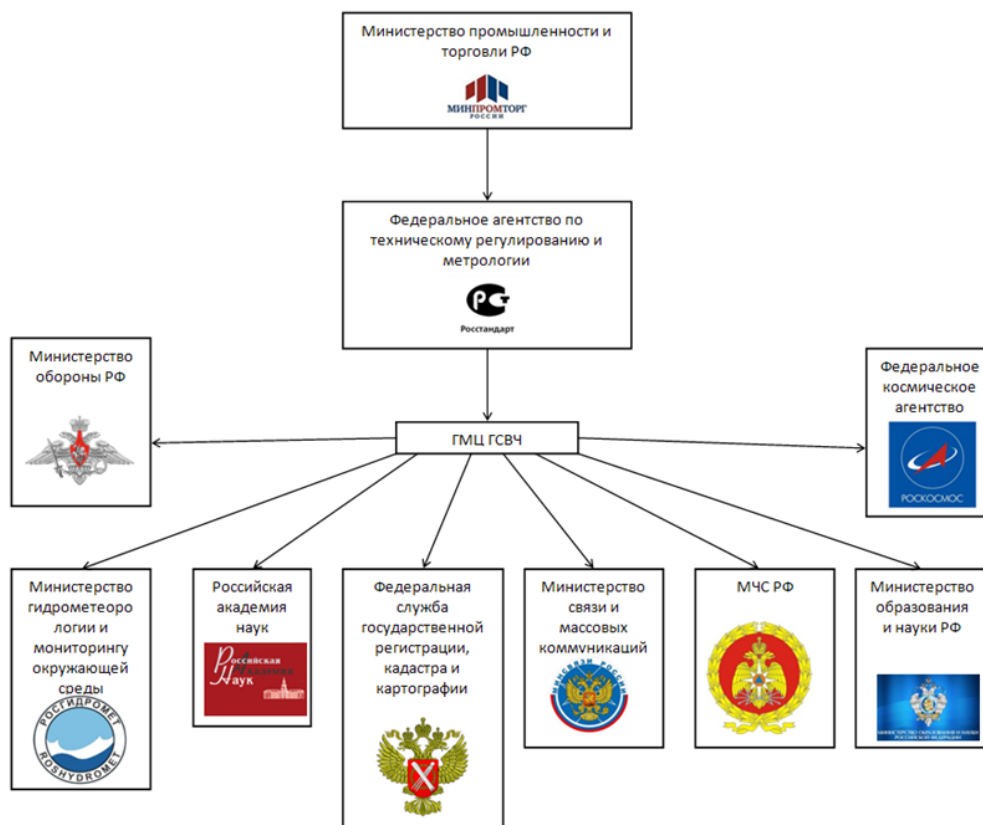


Рис. 1. Федеральные органы исполнительной власти и организации, функционально входящие в состав ГСВЧ

В настоящей статье изложены правовые основы деятельности Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли, основные направления деятельности, состав технических средств и эталонной базы, а также перспективы развития ГСВЧ.

Правовые и законодательные основы деятельности ГСВЧ, основные направления ее деятельности

Деятельность ГСВЧ регламентирована следующими документами:

- Федеральным законом от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений»;
- Федеральным законом от 3 июня 2011 г. № 107-ФЗ «Об исчислении времени» (с изменениями от 21 июня 2014 г.);
- Указом Президента РФ № 638 от 17 мая 2007 г. «Об использовании глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС в интересах социально-экономического развития РФ»;
- Постановлением Правительства РФ от 23 марта 2001 г. № 225 «Об утверждении Положения о Государственной службе времени, частоты и определения параметров вращения Земли» (с изменениями от 2 августа 2005 г., от 10 марта, от 02 сентября 2009 г., 08 сентября 2010 г., 31 января 2012 г.);
- Постановлением Правительства РФ № 323 от 30 апреля 2008 г. «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»;
- приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 381 от 31 марта 2015 года «Об обеспечении деятельности Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли».

Общее руководство деятельностью ГСВЧ осуществляет Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии.

Государственный метрологический надзор и научно-методическое руководство по обеспечению единства измерений времени и частоты на объектах ГСВЧ осуществляет Главный метрологический центр ГСВЧ (далее ГМЦ ГСВЧ).

Технические средства и системы ГСВЧ, находящиеся в ведении Министерства обороны Российской Федерации, используются Государственной службой времени при выполнении своих функций.

Методическое и оперативное управление работой систем и средств ГСВЧ военного назначения осуществляют организации, определяемые Министерством обороны Российской Федерации в пределах установленных полномочий.

Основные направления деятельности ГСВЧ:

- обеспечение независимого воспроизведения, хранения и передачи еди-

ниц времени, частоты и национальной шкалы времени с заданными характеристиками;

- определение и прогнозирование ПВЗ с заданными характеристиками;
- обеспечение потребности государства в ЭСЧВ и в информации о точном значении московского времени и календарной дате, а также в информации о ПВЗ;
- метрологический и оперативный контроль ЭСЧВ, передаваемых российскими и иностранными техническими средствами и системами;
- участие в международных ключевых сличениях CCTF-K001.UTC;
- международное сотрудничество в области обеспечения единства измерений времени, частоты и определения ПВЗ;
- разработка нормативной и методической документации в области обеспечения единства измерений времени, частоты и определения ПВЗ;
- представление потребителям официальной информации и справочных данных ГСВЧ.

Функции ГМЦ ГСВЧ:

- Государственный метрологический надзор и научно-методическое руководство по обеспечению единства измерений времени и частоты на объектах ГСВЧ осуществляет ГМЦ ГСВЧ.
- Технические средства и системы ГСВЧ, находящиеся в ведении Министерства обороны Российской Федерации, используются Государственной службой времени при выполнении своих функций.
- Методическое и оперативное управление работой систем и средств ГСВЧ военного назначения осуществляют организации, определяемые Министерством обороны Российской Федерации в пределах установленных полномочий.

Состав технических средств и эталонной базы ГСВЧ

Состав и структура технических систем и средств ГСВЧ (рис.2) и документы, регламентирующие взаимодействие организаций федеральных органов исполнительной власти, утверждаются Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии. Организационная структура ГСВЧ утверждена приказом руководителя Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 06 февраля 2007 г. № 324.

В соответствии с представленной структурой и составом технических средств и эталонной базы ГСВЧ, приведенных на рис.2, ГМЦ ГСВЧ обеспечивает выполнение следующих мероприятий:

- обеспечение непрерывного функционирования и развития технических средств и систем ГСВЧ;

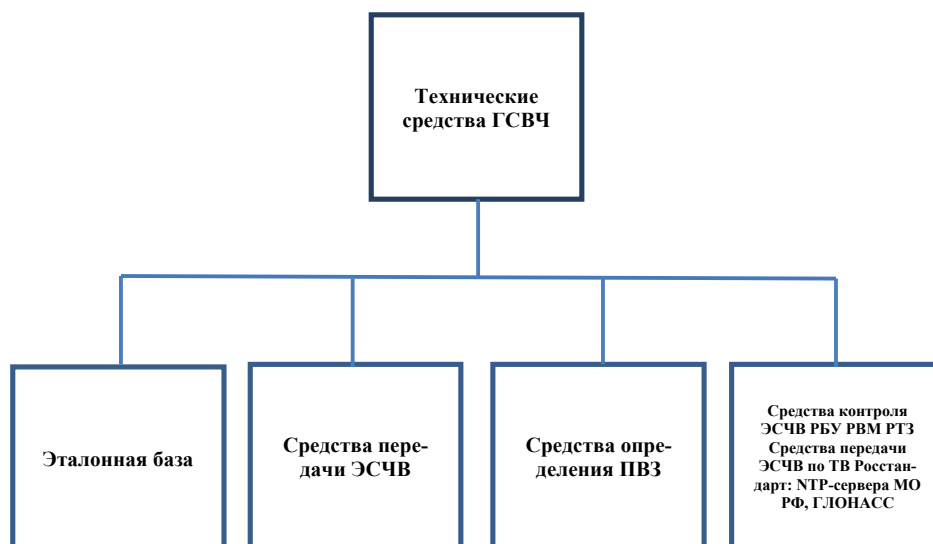


Рис.2. Организационная структура ГСВЧ

- обеспечение независимого воспроизведения, хранения единиц времени, частоты и национальной шкалы времени, а также их передачи потребителям с заданными характеристиками;

- обеспечение определения и прогнозирования ПВЗ с заданными характеристиками;

- обеспечение потребностей государства в ЭСЧВ и в информации о точном значении московского времени и календарной дате, распространяемых с использованием глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС, спутниковых систем связи, радиосвязи, радиовещания, телевидения и глобальной сети Интернет, а также в информации о ПВЗ;

- обеспечение передач ЭСЧВ в соответствии с требованиями Бюллетеня В 14 / 2013 «Эталонные сигналы частоты и времени. Характеристики и программы передач через радиостанции, наземные и космические средства навигации, сети телевизионного вещания»;

- метрологический и оперативный контроль передачи ЭСЧВ и информации о точном значении московского времени и календарной дате, передаваемых российскими техническими средствами и системами;

- метрологический и оперативный контроль передачи ЭСЧВ иностранными техническими средствами и системами;

- обеспечение предоставления потребителям официальной информации и справочных данных ГСВЧ;

- организация международного сотрудничества в области обеспечения единства измерений времени, частоты и определения ПВЗ и участия Госу-

дарственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2012 (ГЭВЧ) в ключевых сличениях ССТФ-К001.UTC;

- разработка нормативной и методической документации в области обеспечения единства измерений времени, частоты и определения ПВЗ.

В соответствии с приказом Росстандарта от 06 февраля 2007 года №324, в состав эталонной базы ГСВЧ входят следующие эталоны единиц времени и частоты:

- Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2012 (ГЭВЧ), содержащийся и применяемый в ГМЦ ГСВЧ;

- Государственный вторичный эталон единиц времени и частоты ВЭТ 1-5, содержащийся и применяемый в ПМК ГСВЧ, г. Иркутск;

- вторичный эталон единиц времени и частоты ВЭТ 1-7, содержащийся и применяемый в ПМК ГСВЧ, г. Хабаровск;

- вторичный эталон единиц времени и частоты ВЭТ 1-19, содержащийся и применяемый в ПМК ГСВЧ, г. Новосибирск;

- рабочий эталон единиц времени и частоты РЭТ 1-1, содержащийся и применяемый в ПМК ГСВЧ, г. Петропавловск-Камчатский.

Также в эталонную базу ГСВЧ функционально входит ведомственный групповой эталон единиц времени и частоты ВГЭ (Московская обл.) в составе:

- ведомственный эталон единиц времени и частоты ВЭ-31;

- ведомственный эталон единиц времени и частоты ВЭ-33.

Состав эталонной базы ГСВЧ приведён на рис. 3.

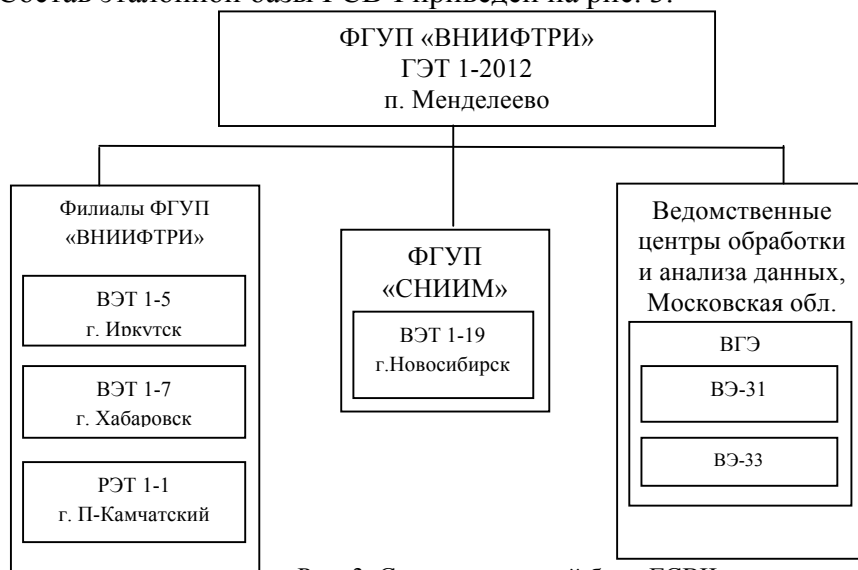


Рис. 3. Состав эталонной базы ГСВЧ

Требования к метрологическим характеристикам эталонов Росстандарта приведены в таблице 1.

Таблица 1
Требования к метрологическим характеристикам эталонов Росстандарта

Характеристика, единица измерения	Требования к характеристикам
ГЭТ 1-2012	
Неисключенная систематическая погрешность воспроизведения единиц времени и частоты	$\leq 5,0 \cdot 10^{-16}$
Относительная нестабильность единиц времени и частоты при интервалах времени измерения 10 ... 30 сут и интервале времени наблюдений 1 год	$\leq 1,0 \cdot 10^{-15}$
Пределы допускаемых смещений национальной шкалы координированного времени UTC(SU) относительно Международной шкалы координированного времени UTC, нс	± 7
ВЭТ 1-5, ВЭТ 1-7	
Относительная нестабильность единиц времени и частоты TA(k) при интервалах времени измерения 10 - 30 суток	$\leq 5,0 \cdot 10^{-15}$
Пределы допускаемых смещений шкал координированного времени UTC(k) относительно национальной шкалы координированного времени UTC(SU), нс	± 30
Суммарная погрешность	$\leq 1,0 \cdot 10^{-14}$
Пределы допускаемых смещений рабочей шкалы времени относительно шкалы координированного времени UTC(k), нс	± 10
Случайная погрешность (СКДО) сравнения шкал времени UTC(SU) и UTC(k) по сигналам КНС, при $t_i = 1$ сут, $t_n = 30$ сут, нс	≤ 5
РЭТ 1-1	
Относительная нестабильность единиц времени и частоты TA(Pm) при интервалах времени измерения 10 - 30 суток	$\leq 5,0 \cdot 10^{-14}$
Пределы допускаемых смещений шкал координированного времени UTC(Pm) относительно национальной шкалы координированного времени UTC(SU), нс	± 100
Суммарная погрешность	$\leq 1,0 \cdot 10^{-13}$
Пределы допускаемых смещений рабочей шкалы времени относительно шкалы координированного времени UTC(Pm), нс	± 10
Случайная погрешность (СКДО) сравнения шкал времени UTC(SU) и UTC(Pm) по сигналам КНС, при $t_i = 1$ сут, $t_n = 30$ сут, нс	≤ 5

Основные характеристики Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2012

Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2012 (ГЭВЧ) предназначен для независимого воспроизведения и хранения единиц времени, частоты и национальной шкалы времени UTC(SU) и их передачи потребителям и включает следующие технические средства:

- комплекс воспроизведения единиц времени и частоты;
- комплекс хранения национальной шкалы времени;
- комплекс передачи единиц времени, частоты и национальной шкалы времени;
- вспомогательные технические средства;
- комплекс средств технического обеспечения.

Состав комплекса воспроизведения единиц времени и частоты приведён в таблице 2.

Таблица 2

Состав комплекса воспроизведения единиц времени и частоты

Наименование	Обозначение	Кол-во
Репер метрологический цезиевый	МГФК.411711.060	1
Репер метрологический цезиевый	МГФК.411711.097	1

Основные метрологические характеристики комплекса воспроизведения единиц времени и частоты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Основные метрологические характеристики комплекса воспроизведения единиц времени и частоты

Характеристика, единица измерения	Значение
Относительная неисключенная систематическая погрешность воспроизведения единиц времени и частоты с использованием МЦР «Фонтан» МГФК 411711.060	$\leq 3,0 \cdot 10^{-15}$
Относительная неисключенная систематическая погрешность воспроизведения единиц времени и частоты с использованием МЦР «Фонтан» МГФК 411711.097	$\leq 5,0 \cdot 10^{-16}$
Среднее квадратическое отклонение результатов измерений при воспроизведении единиц времени и частоты при интервале времени измерения 1 сут	$\leq 5,0 \cdot 10^{-15}$

Внешний вид МЦР «Фонтан» МГФК 411711.097 представлен на рисунке 4.

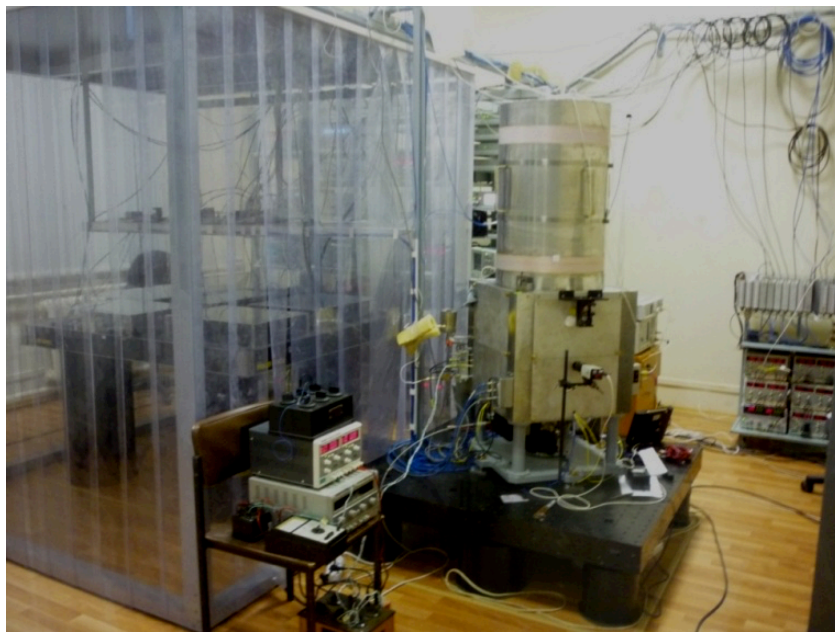


Рис. 4. МЦР «Фонтан» МГФК 411711.097

Принцип действия МЦР основан на охлаждении атомов цезия-133 (^{133}Cs) до температур в единицы мК путем их взаимодействия со световыми фотонами, удержании атомов и управления их движением. Использование современных лазерных технологий для охлаждения атомов цезия позволило кардинально (приблизительно в 100 раз) повысить точность воспроизведения единиц времени и частоты в сравнении с тепловыми реперами частоты.

Оценка относительной неисключенной систематической погрешности (НСП) воспроизведения единиц времени и частоты производится расчётным методом. Исходными данными для расчётов являются составляющие НСП, обусловленные:

- сдвигом частоты часового перехода из-за наличия постоянного магнитного поля ВС (квадратичный эффект Зеемана);
- сдвигом частоты из-за расстройки СВЧ-резонатора;
- зависимостью от мощности зондирующего СВЧ сигнала;
- штарковским сдвигом из-за тепловых излучений (эффект излучения «чёрного тела»);
- гравитационным эффектом и т.д.

Составляющие НСП были оценены в 2012 году в ходе предварительных

испытаний усовершенствованного Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2012. К настоящему времени уточнялись составляющие НСП, обусловленные квадратичным эффектом Зеемана, зависимостью от мощности зондирующего СВЧ сигнала, гравитационным сдвигом и т.д. Результаты оценки НСП приведены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты оценки относительной неисключенной систематической погрешности воспроизведения единиц времени и частоты

Физический эффект	Сдвиг, Δf (10^{-16})	Погрешность, σ_i (10^{-16})
Эффект Зеемана 2-го порядка	1069	0,1
Излучение «черного тела»	- 165,5	1,0
Гравитационный сдвиг	244,3	0,5
Зависимость от мощности СВЧ сигнала	0,1	1,8
Затягивание резонатором	0,014	0,1
Амплитуднофазовая модуляция зондирующего сигнала	0	0,1
Световой сдвиг	0	0,1
Градиент фазы в резонаторе СВЧ	0,37	0,75
Микроволновая утечка	0	0,1
Столкновения с остаточным газом	0	1,0
Относительная неисключенная систематическая погрешность воспроизведения единиц времени и частоты		2,5

СКО результатов измерений при воспроизведении единиц времени и частоты при интервале времени измерения 1 сут не превышало $5,0 \cdot 10^{-15}$, что соответствует требованиям эксплуатационных документов эталона.

В таблице 5 и в графическом виде на рисунке 5 представлены относительные отклонения частоты метрологических реперов частоты фонтанного типа df/f [Csi-TAI] зарубежных лабораторий и МЦР «Фонтан» МГФК.411711.097 [CsFO2-TAI], усредненные на месячных интервалах времени измерений и опубликованные в циркулярах «Т» МБМВ за 2015 год.

Таблица 5
Относительные отклонения частоты МЦР «Фонтан» МГФК.411711.097

MJD	PFS(BIPM)	$U_{(BIPM)}$	SU-CsFO2	U_{Total}
57019-57049	5.8E-16	3.7E-16		
57049-57079	-4.4E-16	2.6E-16	-4.0E-16	6.9E-16
57079-57109	-2.7E-16	2.5E-16	-4.4E-16	7.8E-16
57109-57139	-2.3E-16	2.6E-16	-1.5E-16	6.2E-16
57139-57169	2.9E-16	2.3E-16	6.8E-16	6.7E-16
57169-57199	8.3E-16	1.8E-16	4.0E-17	6.7E-16
57199-57234	5.5E-16	2.7E-16	7.8E-16	6.1E-16
57234-57264	3.9E-16	3.0E-16	-2.7E-16	7.1E-16
57264-57294	1.7E-16	2.5E-16	3.0E-16	6.8E-16
57294-57324	3.4E-16	2.6E-16	7.1E-16	9.2E-16

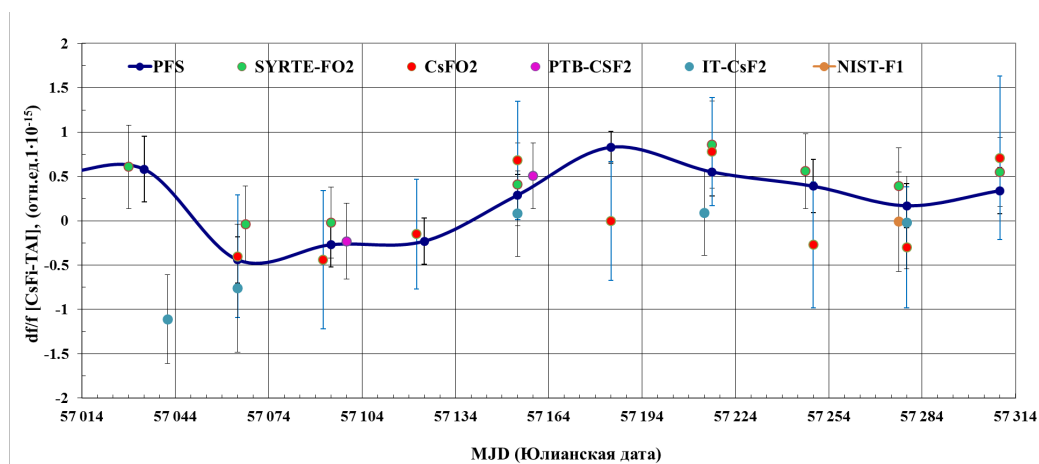


Рис. 5. Относительные отклонения частоты метрологических реперов частоты фонтанного типа $diff [CsFi-TAI]$ зарубежных лабораторий и МЦР «Фонтан» МГФК.411711.097 за 2015 год

Таким образом, комплекс средств воспроизведения единиц времени и частоты из состава ГЭВЧ по своим характеристикам находится на уровне ведущих зарубежных лабораторий времени.

В качестве средств хранения единиц времени и частоты в составе ГЭВЧ применяются стандарты частоты и времени водородные (СЧВ) – восемь комплектов типа Ч1-75А производства ННИПИ «Кварц» и один СЧВ с улучшенной краткосрочной нестабильностью частоты производства ЗАО «Время-Ч» (рис.6).



Рис.6. Стандарты частоты и времени водородные Ч1–75А

Для формирования рабочих шкал времени используются комплексы рабочих шкал времени (РШВ), предназначенные для формирования импульсных сигналов 1 Гц, согласованных с национальной шкалой координированного времени UTC(SU) с заданной точностью, для формирования высокочастотных синусоидальных сигналов 5 и 10 МГц, а также для обеспечения опорными сигналами различных технических средств ГМЦ ГСВЧ.

Результаты оценки смещений национальной шкалы координированного времени UTC(SU) относительно Международной шкалы координированного времени UTC получаются на основе официальных данных МБМВ - смещения национальной шкалы координированного времени UTC(SU) относительно международной шкалы координированного времени UTC, опубликованные в циркулярах серии «Т».

Таким образом, смещения национальной шкалы времени UTC(SU) относительно международной шкалы координированного времени UTC в 2015 году находились в пределах ± 7 нс.

Результаты оценки смещения за 2015 год представлены на рисунке 7.

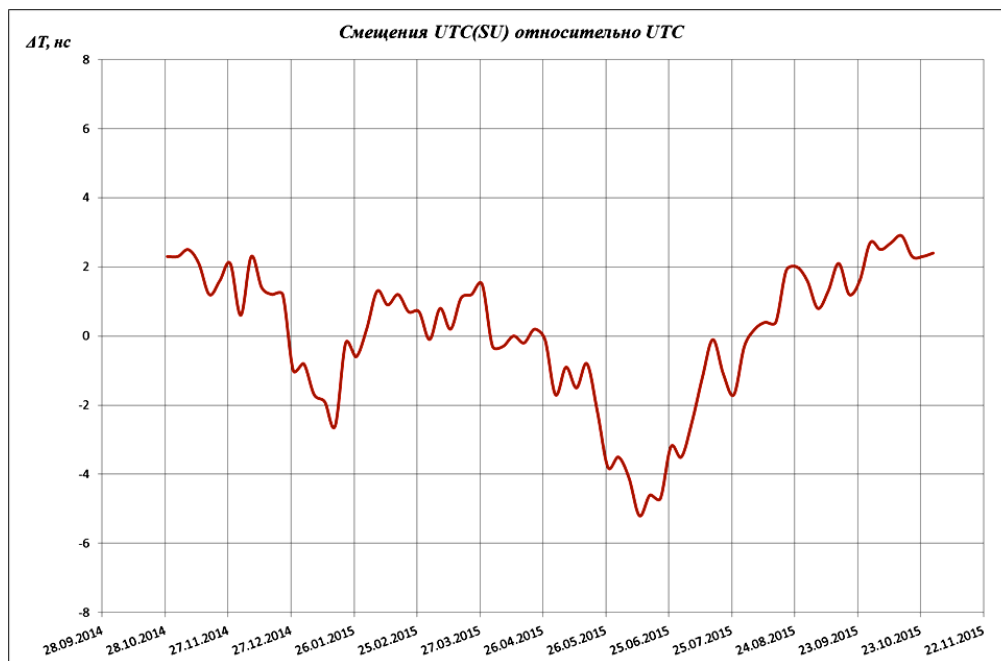


Рис. 7. Смещения национальной шкалы времени UTC(SU) относительно UTC в 2015 году

ГМЦ ГВСЧ на регулярной основе принимает участие в сличениях Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2012 в рамках Международных мероприятий ССТF-K001. UTC.

Ключевые сличения ССТF-K001. UTC выполняются на основании Договора о взаимном признании Международного Комитета по мерам и весам (MRA CIPM). Это единственное ключевое сличение, определенное Консультативным Комитетом по времени и частоте (ККВЧ) в рамках мандата МКМВ и возглавляемое МБМВ. Эти сличения в МБМВ осуществляются с 1988 г. и в 2001 году были определены ККВЧ в качестве ключевых сличений MRA CIPM.

ГЭВЧ участвует в подобных сличениях на протяжении более 40 лет. Измерительная информация ГЭВЧ регулярно представляется в МБМВ и публикуется МБМВ в Циркулярах «Т». Циркуляр «Т» издается ежемесячно, оценки производятся на пятисуточном интервале времени измерения для всех участвующих лабораторий (по состоянию на октябрь 2015 - 74 лаборатории).

Во исполнение рекомендаций Отделения времени МБМВ по обеспечению ССТF-K001.UTC ФГУП «ВНИИФТРИ» в 2015 году осуществлял передачу измерительной информации ГЭВЧ установленного формата и содержания.

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) - (clock data files, clock step data files);

- данные приемов сигналов ГНСС ГЛОНАСС и GPS относительно национальной шкалы времени UTC(SU) - (GPS+GLONASS data files);

- данные сличений по частоте опорного СЧВ из состава ГЭВЧ относительно первичных цезиевых реперов частоты фонтанного типа (PFS data).

За 2015 год передано по 365 файлов о смещениях шкал времени СЧВ из состава ГЭВЧ относительно национальной шкалы времени UTC(SU) и приемов сигналов ГНСС ГЛОНАСС и GPS относительно национальной шкалы времени UTC(SU). Общий объем переданной измерительной информации более 300 МБ.

Измерительная информация ГЭВЧ позволила обеспечить вклад в формирование Международной шкалы атомного времени TAI и Международной шкалы координированного времени UTC. Участие в ключевых сличениях обеспечило прослеживаемость национальной шкалы времени UTC(SU) к UTC. Степень эквивалентности перечисленных величин подтверждена в официальных циркулярах МБМВ «Т» №, № 323 – Т 334.

В течение 2015 года основным каналом сличений были дифференциальные сравнения шкал времени по сигналам ГНСС. При этом в соответствии с Циркулярами «Т» неопределенности u_A и u_B составляли соответственно 0,9 нс и 4,6 нс, суммарная стандартная неопределенность измерений u_c составляла 4,7 нс.

Публикуемые в Циркулярах «Т» данные являются единственным официальным источником, на основании которых может быть подтверждена степень эквивалентности национальных шкал времени TA(SU) и UTC(SU) относительно TAI и UTC.

На рис. 8 представлены сравнительные оценки смещений шкал координированного времени относительно UTC, UTCr относительно TAI ведущих лабораторий мира, полученные по результатам ключевых сличений MRA CIRM в 2015 году (Циркуляры «Т» №, № 323÷334).

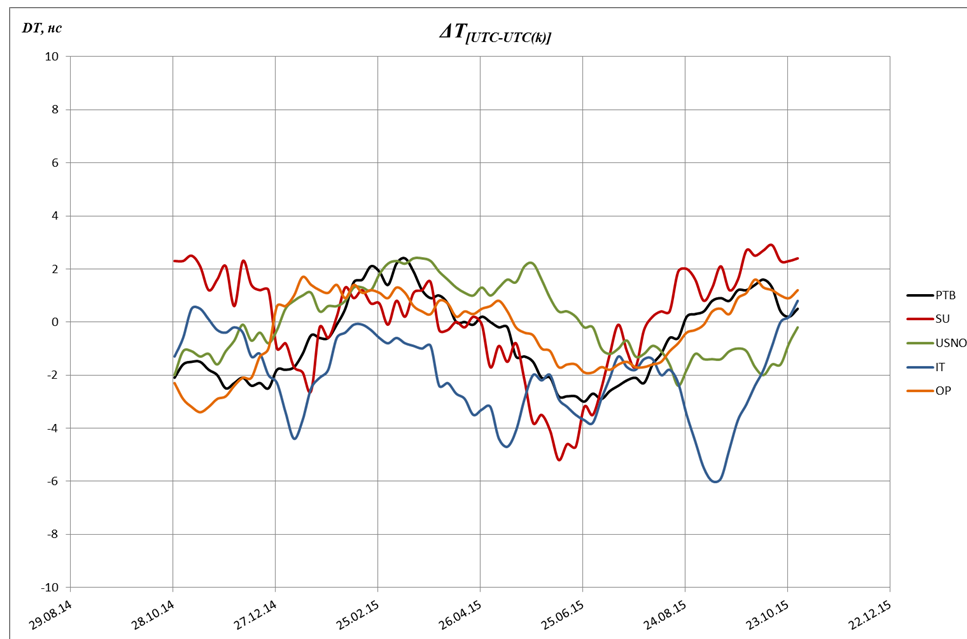


Рис. 8. Сравнительные оценки смещений шкал координированного времени ведущих лабораторий мира относительно UTC, полученные по результатам ключевых сличений MRA CIPM

Приведённые сравнительные оценки подтверждают, что национальная шкала времени UTC(SU) по своим характеристикам входит в число лучших реализаций Международной шкалы координированного времени UTC.

Более подробная информация о структуре технических средств ГСВЧ и характеристиках эталонной базы содержится в статье И.Б.Норца настоящего Альманаха. Деятельность ГСВЧ в области определения параметров вращения Земли представлена в статье С.Л.Пасынка.

Участие ГСВЧ в мероприятиях Федеральной целевой Программы ГЛОНАСС и перспективные направления ее дальнейшего развития

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 30 апреля 2008 года № 323 обеспечение системы ГЛОНАСС эталонными значениями времени и частоты, национальной шкалой времени и данными о параметрах вращения Земли осуществляет Служба времени ГСВЧ. Для астрометрического, геодезического, частотно–временного и геодезического обеспечения системы ГЛОНАСС должна использоваться совокупность как действующих, так и создаваемых средств измерений ГСВЧ. Эти средства измерений предназначены для:

Альманах современной метрологии, 2016, №8

– построения небесной и земной систем координат и их реализации в виде каталогов координат внегалактических радиоисточников в разных диапазонах длин волн, а также координат и скоростей опорных станций;

– определения параметров вращения Земли (координаты полюса, всемирное время, нутационные углы, прецессия);

– построения национальной шкалы координированного времени UTC(SU) и поддержание её в заданных пределах по отношению к шкале Всемирного координированного времени UTC;

– построения динамических систем отсчёта и их реализация в виде эфемерид тел Солнечной системы и космических аппаратов;

– определения параметров гравитационного поля Земли.

Система ГЛОНАСС опирается на так называемый фундаментальный сегмент, который включает в себя три основных комплекса:

- средств формирования национальной шкалы времени UTC(SU);

- средств определения и прогнозирования параметров вращения Земли (ПВЗ);

- средств уточнения фундаментальных астрономо-геодезических параметров.

Первый комплекс средств состоит из Государственного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (ГЭВЧ); вторичных и рабочих эталонов Росстандарта, Минобороны России и других министерств и ведомств; средств сравнений шкал времени UTC и UTC(SU), а также шкал времени центрального синхронизатора ГЛОНАСС с UTC(SU).

Второй комплекс средств определения и прогнозирования ПВЗ включает средства измерений, обеспечивающие получение первичной измерительной информации на объектах Росстандарта, Минобороны России, Роскосмоса, РАН (квантово-оптические системы (КОС); приемники сигналов спутниковой системы, радиоинтерферометры со сверхдлинными базами, центры корреляционной обработки данных, аппаратно-программные средства передачи данных; центры обработки и анализа данных Росстандарта, обеспечивающие формирование официальных данных о ПВЗ, Минобороны России, РАН.

Наконец, третий комплекс средств уточнения фундаментальных астрономо-геодезических параметров включает аппаратно-программные средства (АПС) уточнения небесной системы координат, АПС уточнения земной системы координат, АПС уточнения эфемерид тел Солнечной системы, орбит геодезических и навигационных искусственных спутников Земли, АПС уточнения гравитационного поля Земли, АПС уточнения параметров атмосферы.

Развитию двух первых комплексов формирования UTC(SU) и определения ПВЗ было уделено основное внимание в работах Росстандарта в ходе выполнения Федеральной целевой программы «Глобальная навигационная

система», поскольку комплекс фундаментального обеспечения ГЛОНАСС в основном определяется измерениями времени и частоты, поэтому в работе всех перечисленных его компонент важную роль играет ГСВЧ.

В рамках мероприятий ФЦП ГЛОНАСС была проведена модернизация средств фундаментального сегмента системы ГЛОНАСС, а именно эталонов единиц времени, частоты и длины, систем определения параметров вращения Земли и систем сбора и передачи данных в реальном времени, аппаратуры формирования, контроля и управления системы передач эталонных сигналов частоты и времени по коротковолновым, длинноволновым и телевизионным каналам и аппаратуры рабочих эталонов пунктов передачи.

В результате создан комплекс технических средств, обеспечивающих воспроизведение единиц времени и частоты, в первую очередь, метрологический цезиевый репер частоты типа «фонтан», использующий технологии лазерного охлаждения атомов и предназначенный для повышения точности независимого воспроизведения единиц времени и частоты Государственным первичным эталоном времени и частоты. Репер частоты позволил улучшить в 100 раз характеристики воспроизводимости единиц времени и частоты в РФ до значений $5 \cdot 10^{-16}$, что в настоящее время находится на уровне ведущих лабораторий времени стран мира (Франции, Германии, США).

Для обеспечения хранения единиц времени и частоты, формирования национальной шкалы времени UTC(SU) в состав эталонной базы ГСВЧ введены водородные стандарты времени и частоты с нестабильностью частоты не более $1,0 \cdot 10^{-15}$, создан комплекс формирования и передачи национальной шкалы времени UTC(SU) в наземный комплекс управления ГЛОНАСС в реальном масштабе времени, внедрены современные средства сравнений шкал времени на основе передачи сигналов времени по каналам двусторонней (дуплексной) связи через геостационарные спутники TWSTFT с погрешностью не более ± 2 нс, модернизирована техническая инфраструктура эталонной базы ГСВЧ.

В настоящее время в ГМЦ ГСВЧ проводится модернизация комплексов хранения национальной шкалы времени UTC(SU) для обеспечения её согласования с Международной шкалой координированного времени UTC не более ± 3 нс, а также разработка высокоточных средств сравнений национальной шкалы времени со шкалой времени системы ГЛОНАСС и другими удалёнными хранителями шкал времени. Для реализации этой цели используются водородные генераторы, разработанные специалистами ЗАО «Время-Ч» с уникальными метрологическими характеристиками (нестабильность частоты генерации не превышает значения $3 \cdot 10^{-16}$ на суточном интервале измерений). На рис.9 изображен эталонный комплекс времени и частоты, который в настоящее время находится в режиме опытной эксплуатации.

Модернизация комплексов хранения национальной шкалы времени



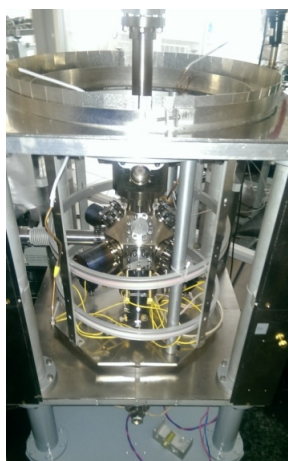
Рис. 9. Эталонный комплекс времени и частоты

В рамках выполнения мероприятий ФЦП ГЛОНАСС в ФГУП «ВНИИФТРИ» проводятся работы по созданию квантовых хранителей времени и частоты нового поколения, основанных на использовании рубидиевых атомных фонтанов. В сравнении с широко распространенными водородными хранителями частоты, в этих устройствах полностью отсутствует дрейф частоты, обусловленный соударениями атомов со стенками колбы и эффектом старения покрытия колбы, что является проблемным моментом их эксплуатации. По завершению опытной эксплуатации эти хранители войдут в состав Государственного первичного эталона времени и частоты Российской Федерации. На рис.10 изображены оптическая система и атомный спектроскоп рубидиевого хранителя фонтанного типа.

Создание хранителя единиц времени и частоты
на основе фонтана атомов рубидия



Оптическая часть



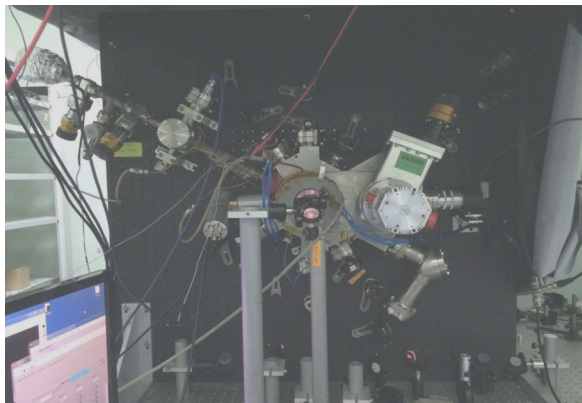
Спектроскоп

Рис. 10. Составные части рубидиевого хранителя времени и частоты фонтанного типа

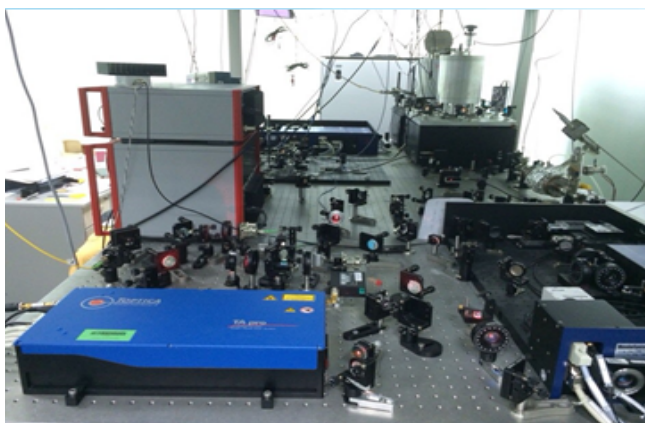
В настоящее время во ВНИИФТРИ в рамках выполнения мероприятий ФЦП ГЛОНАСС выполняются также работы по созданию оптического репера частоты наземного базирования, который должен обеспечивать независимое воспроизведение единицы частоты в оптическом диапазоне с длиной волны 698 нм на запрещенном переходе 1S_0 - 3P_0 фермионного изото-

па ^{87}Sr . Точность и нестабильность воспроизведения единиц времени и частоты создаваемого в ФГУП «ВНИИФТРИ» оптического стандарта составит несколько единиц шестнадцатого знака (потенциально - несколько единиц восемнадцатого знака). На рис.11 приведены фотографии основных компонент оптического стандарта частоты на атомах стронция.

Создание оптического стандарта времени и частоты
на холодных атомах стронция



Физическая часть оптического стандарта



Элементы лазерной системы оптического стандарта

Рис. 11. Составные части оптического стандарта времени и частоты на холодных атомах стронция

С целью уменьшения погрешности сравнения шкалы времени UTC(SU) со шкалами времени лабораторий Евроазиатской рабочей группы, участ-

вующих в сличениях национальных шкал времени с применением канала космической двусторонней (дуплексной) связи TWSTFT, в 2012 году была разработана аппаратура дуплексных сличений шкал времени из состава ГЭВЧ (рис.12 и рис.13). С 26 октября по 7 ноября 2012 г. специалистами ГМЦ ГСВЧ совместно со специалистами немецкого метрологического института РТВ проведены сравнения национальных шкал координированного времени ФРГ - UTC(РТВ) и Российской Федерации - UTC(SU) тремя независимыми методами:



Рис.12. Стационарный комплекс космической дуплексной связи ФГУП «ВНИИФТРИ»

- сравнения шкал времени UTC(SU) и UTC(РТВ) с помощью стационарного и мобильного комплексов космической дуплексной аппаратуры связи TWSTFT,
- сравнения шкал времени UTC(SU) и UTC(РТВ) с помощью перевозимого калибровочного приемника ГНСС,
- сравнения шкал времени UTC(SU) и UTC(РТВ) с помощью перевозимых квантовых часов (ТС).

Полученные результаты обработаны ФГУП «ВНИИФТРИ» и РТВ, совместный отчёт представлен в МБМВ. Проведённые мероприятия по калибровке комплекса аппаратуры дуплексных сличений шкал времени из состава ГЭВЧ позволили перейти на качественно новый канал сличений национальной шкалы времени UTC(SU) со шкалой.

Всемирного координированного времени UTC и улучшить его характеристики в пять раз (рис.14). В течение 2013 года основным каналом сличений были дифференциальные сличения с использованием сигналов космических



Рис.13. Мобильный комплекс космической дуплексной связи ФГУП «ВНИИФТРИ»

навигационных систем ГЛОНАСС/ GPS. С 29 сентября 2013 года сличения UTC(SU) с UTC проводились по новому каналу дуплексной связи TWSTFT.

В рамках мероприятий ФЦП ГЛОНАСС в ГМЦ ГСВЧ проводятся работы по оценке возможностей метода сравнения по волоконно-оптическим линиям шкал времени водородных мазеров с использованием модемов SATRE.

В частности, была создана экспериментальная установка по передаче эталонных сигналов времени по волоконным линиям разной длины - от нескольких метров до 200 км. В экспериментальной установке использовались оптические трансмиттеры (ОТ) и ресиверы (ОР) фирмы Emcoqe.

Волоконно-оптические линии представляли собой несколько последовательно включенных лабораторных катушек оптического волокна SMF-28. Для кодирования и декодирования передаваемых сигналов времени были применены модемы SATRE, работающие на максимальной скорости фазовой манипуляции - 20 MChip/s. На концах волоконной были установлены оптические циркуляторы, что обеспечивало двухстороннюю передачу эталонных сигналов в одном оптическом волокне. Измерения проводились с волоконно-оптическими линиями длиной 2 м, 2 км, 50 км, 100 км и 200 км.

При передаче эталонных сигналов в линиях длиной 100 км и 200 км использовались промежуточные двунаправленные оптические EDFA усилители.

Выполненные на экспериментальной установке измерения подтвердили, что случайная погрешность U_A сравнения шкал времени в линиях разной длины не превышает 10 пс на временах усреднения от 10^3 с до 10^5 с.

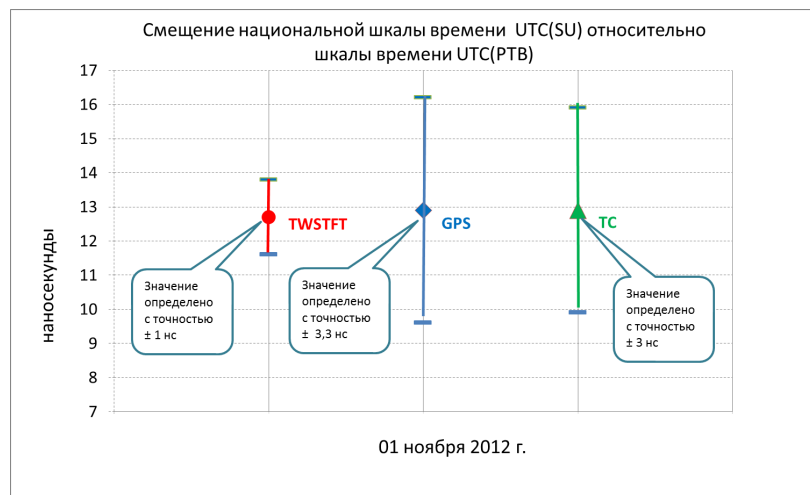


Рис.14. Результаты сравнений шкал времени UTC(SU) и UTC(PTB) тремя независимыми методами

Неисключенная систематическая погрешность U_B сравнения шкал времени оценена нами на уровне меньшем 100 пс. Погрешность U_B в основном определяется точностью калибровок задержек в радиочастотных кабелях и электронных устройствах, подключенных к концам оптической линии передачи эталонных сигналов.

Участие ГСВЧ в мероприятиях ФЦП ГЛОНАСС в период до 2020 г.

Росстандарт является государственным заказчиком работ по разработке и модернизации эталонной базы координатно-временного и навигационного обеспечения системы ГЛОНАСС в рамках Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы», утвержденной постановлением Правительства РФ от 3 марта 2012 года №189.

При выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ этой программы с целью обеспечения заданных тактико-технических характеристик системы ГЛОНАСС до 2020 года проводится дальнейшее совершенствование средств воспроизведения, хранения и передачи единиц времени, частоты и национальной шкалы времени UTC(SU) в части:

- модернизации комплексов хранения национальной шкалы времени для обеспечения согласования национальной шкалы времени UTC(SU) с UTC с погрешностью не более ± 3 нс;

- разработки высокоточных средств сравнений национальной шкалы времени UTC(SU) со шкалой времени системы ГЛОНАСС и другими эталонами времени и частоты;

- создания хранителя единиц времени и частоты на основе фонтана атомов рубидия с нестабильностью $(1 - 2) \cdot 10^{-16}$ для оснащения эталонов единиц времени и частоты, а также оптических стандартов частоты с неисключенной систематической погрешностью не более $1 \cdot 10^{-16}$;

- создания высокоточного канала передачи эталонных сигналов времени и частоты по волоконно-оптической линии связи.

Существующие и планируемые характеристики средств передачи национальной шкалы времени UTC (SU) представлены на рис. 15

Перспективы развития ГСВЧ в части характеристик средств формирования и передачи национальной шкалы времени UTC(SU)

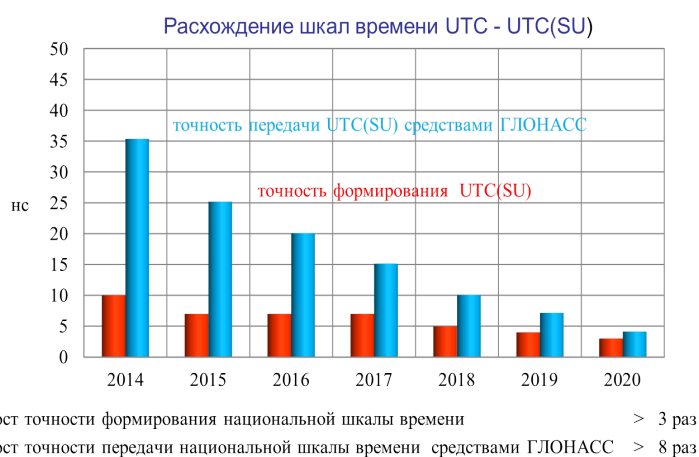


Рис.15. Перспективы развития точности формирования и передачи UTC (SU)

Таким образом, выполнение мероприятий Федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012 – 2020 годы», направленных на создание и модернизацию средств формирования UTC(SU) и средств определения параметров вращения Земли, основой которых являются технические средства ГСВЧ, обеспечит конкурентоспособное развитие отечественной навигационной космической системы ГЛОНАСС и потребности всех пользователей страны в информации о точном времени и координатах, позволит улучшить тактико-технические характеристики системы ГЛОНАСС с целью достижения её паритета с иностранными системами навигационного обеспечения, лидирующих позиций Российской Федерации в области спутниковой навигации, а также эффективного применения современных и перспективных технических систем, обеспечит использование системы ГЛОНАСС как на территории России, так и за ее пределами.

Международное сотрудничество ГСВЧ в области обеспечения единства измерений времени, частоты и определения ПВЗ

Главным метрологическим центром ГСВЧ проводятся работы по осуществлению международного сотрудничества и исполнению международных обязательств России (в том числе перед государствами-участниками СНГ) по обеспечению функционирования ГСВЧ. Эти работы регламентируются Постановлением Правительства Российской Федерации от 23 марта 2001 г. № 225 п.7 «Участие в международном сотрудничестве, представление интересов страны по вопросам Государственной службы времени в международных организациях и реализация международных договоров Российской Федерации в области единства измерений времени, частоты и параметров вращения Земли».

Одним из основных видов деятельности ГСВЧ в международной кооперации по реализации Метрической конвенции в части измерений времени и частоты является представление ФГУП «ВНИИФТРИ» данных измерений в Секцию времени МБМВ, которые наряду с данными других лабораторий используются ею для формирования шкал TAI и UTC. В соответствии с порядком, установленным Секцией времени МБМВ, ежемесячно, не позднее четвертого числа следующего за отчетным месяца, в файл-сервер Отделения времени, частоты и гравиметрии выкладываются файлы установленного формата с результатами приемов сигналов систем ГНСС на шкалу времени UTC(SU). Кроме того, МБМВ в виде файлов установленного формата ежемесячно получает значения поправок к шкалам хранителей ГЭВЧ на 00 h UTC в юлианские даты (MJD), оканчивающиеся на цифры 4 и 9, стандартные юлианские даты.

Помимо участия в упомянутой выше оперативной деятельности в рамках Метрической конвенции ГМЦ ГСВЧ участвует в работе ее других органов, например, в Консультативных комитетах по длине (ККД), времени и частоте (ККВЧ), а также в рабочей группе ККВЧ по координации разработки передовых средств передачи времени и частоты (WG ATFT) под председательством Dr P. Tuckey.

Одним из основных видов деятельности ГСВЧ в международной кооперации по реализации Метрической конвенции в части определения параметров вращения Земли является представление результатов измерений с пунктов измерения с целью определения параметров вращения Земли в Международную ГНСС службу (IGS), которые наряду с данными других пунктов IGS используются для определения параметров вращения Земли по GPS измерениям, которые затем используются при:

– совместной обработке данных по всем видам измерений и формировании международных опорных значений ПВЗ Международной службы вращения Земли и опорных систем координат (IERS);

Альманах современной метрологии, 2016, №8

– для перехода от небесной к земной системе координат и обратно при использовании орбит КА GPS и ГЛОНАСС, публикуемых Международной ГНСС службой;

– при установлении Международной земной системы координат (ITRF).

ГМЦ ГСВ осуществляет обмен данными с Международной службой вращения Земли и ее измерительными службами:

IVS – Международная РСДБ служба;

ILRS – Международная служба лазерной дальнометрии спутников и Луны;

IGS – Международная ГНСС служба,

а также с EPN – Европейской опорной сетью (EUREF Permanent Network).

ГМЦ ГСВЧ возглавляет Международный технический комитет 1.11 КООМЕТ «Время и частота».

Заключение

Подводя итоги деятельности ГСВЧ, изложенные в данной статье, важно подчеркнуть, что ГСВЧ выполняет главную роль в обеспечении потребности Российской Федерации в узаконенной информации о точном времени, эталонных частотах и параметрах вращения Земли.

Достижение этой цели стало возможным благодаря согласованной работе научно-исследовательских институтов, организаций, министерств и ведомств – участников ГСВЧ по установлению, поддержанию и передаче потребителям национальной шкалы времени Российской Федерации, эталонных частот и ПВЗ, а также по обеспечению единства и достоверности измерений указанных величин.

Таким образом, ГСВЧ относится к основным жизнеобеспечивающим службам государства. Выдаваемые ею сигналы и информация необходимы для работы единой энергосистемы, космических систем, геодезии, картографии. Важно также отметить, что ГСВЧ является существенным фактором суверенитета страны и не может быть заменена (или восполнена) ни на одну из национальных служб времени других стран.

В настоящее время наиболее перспективным направлением деятельности ГМЦ ГСВЧ является активное участие в выполнении Федеральной целевой программы ГЛОНАСС в части создания, поддержания и развития средств и систем ГСВЧ, метрологического контроля и мониторинга ЕС НВО; обеспечения НС НВО размерами единиц времени и частоты, национальной шкалой времени UTC(SU) и данными о ПВЗ; координации работ по частотно-временному обеспечению КНС ГЛОНАСС.