



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
(МИНОБОРОНЫ РОССИИ)  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ГЛАВНЫЙ НАУЧНЫЙ  
МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ  
ЦЕНТР  
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
г. Мытищи, Московская обл., 141006

Экз. № 1

УТВЕРЖДАЮ  
Начальник  
ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России  
доктор технических наук

« 25 » октября 2018 г.



В. Швыдун

### Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу КУПАЛОВА Дмитрия Сергеевича  
«Разработка и исследование спектроскопа для атомных стандартов частоты  
фонтанного типа», представленную на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности  
05.11.15 – «Метрология и метрологическое обеспечение»

Диссертационная работа Купалова Дмитрия Сергеевича выполнена в ФГУП «ВНИИФТРИ» и посвящена решению научной задачи уменьшения погрешности воспроизведения единиц времени и частоты, а именно разработке и исследованию спектроскопа для атомных стандартов частоты и времени «фонтанного типа».

#### *Актуальность темы диссертации*

Методы и средства высокоточных измерений времени и частоты вносят неоценимый вклад в развитие мировой экономики, науки и техники. Прогресс в таких областях как: мобильная связь, интернет, высокоскоростной транспорт, банковские услуги, радиолокация и навигация, контроль космического пространства, прикладная метрология и другие – напрямую зависит от совершенствования стандартов частоты и времени.

На сегодняшний день наиболее высокие требования в части воспроизведения и хранения единиц времени и частоты предъявляются глобальной навигационной системой ГЛОНАСС. В целях расширения внедрения и использования отечественных спутниковых навигационных технологий и услуг системы ГЛОНАСС в интересах специальных и гражданских (в том числе коммерческих и научных) потребителей, международного использования российских технологий спутниковой навигации Правительством Российской Федерации утверждена Федеральная

целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012-2020 годы» (далее – ФЦП). Одним из ключевых целевых индикаторов реализации ФЦП является обеспечение погрешности согласования системной шкалы времени ГЛОНАСС с национальной шкалой времени UTC(SU) на уровне 4 нс. Для достижения указанного показателя предусмотрено создание наземного образца стандарта частоты и времени «фонтанного типа» на охлажденных атомах рубидия с предельно достигаемым значением среднего квадратического относительного двухвыборочного отклонения частоты (СКДО) не более  $2 \cdot 10^{-16}$ .

Таким образом, решаемая в работе **научная задача** разработки и исследования спектроскопа, как составной части стандарта частоты и времени «фонтанного типа», **является актуальной**, а результаты ее решения - своевременными и востребованными практикой.

Представленная диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений.

Во введении обоснована актуальность поставленной задачи, указаны цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, показаны практическая значимость и внедрение полученных результатов, определен личный вклад автора.

В первой главе рассмотрена спектроскопия по методу Рэмси, реализуемая в стандартах частоты и времени «фонтанного типа». Достаточно подробно рассмотрены циклы работы, а также составные части стандарта частоты и времени «фонтанного типа».

Вторая глава посвящена конструкции атомного спектроскопа. Сформулированы требования к его отдельным узлам и блокам. Рассмотрено их функциональное назначение, а также представлены конструктивно-технологические решения, позволяющие достичь стандарту частоты и времени «фонтанного типа» заданной стабильности частоты.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований отдельных узлов и блоков атомного спектроскопа. Описана конструкция, позволяющая перестраивать основной СВЧ резонатор без нарушения вакуума в объеме спектроскопа и адаптировать стандарт частоты и времени «фонтанного типа» к заданной фиксированной температуре в помещении.

Четвертая глава посвящена определению нестабильности частоты стандарта частоты и времени «фонтанного типа» и методам ее численной оценки. Приведены схемы измерения СКДО стандарта частоты и времени «фонтанного типа» относительно опорного водородного генератора и относительно второго рубидиевого стандарта частоты и времени «фонтанного типа». Продемонстрированы результаты экспериментальных исследований стандарта частоты и времени «фонтанного типа», направленных на оценку его нестабильности частоты.

В заключении диссертационной работы изложены основные результаты выполненной работы.

*Научная новизна исследований и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации*

Диссертационную работу отличает сочетание теоретической и прикладной направленности. Автором лично получены следующие выносимые на защиту **научные положения**:

1. Применение разработанного атомного спектроскопа обеспечивает достижение нестабильности частоты рубидиевого стандарта частоты и времени «фонтанного типа» не более  $2 \cdot 10^{-16}$  за время усреднения 16 суток.

2. Импульсный режим работы вспомогательной магнитооптической ловушки увеличивает на 20 % число детектируемых атомов по сравнению с непрерывным режимом работы.

3. Применение перестраиваемого СВЧ резонатора в конструкции спектроскопа позволяет адаптировать стандарт частоты и времени «фонтанного типа» к эксплуатации в помещениях с температурой окружающего воздуха от 21 до 28 °С.

**Научная новизна** полученных лично автором результатов заключается в том, что:

1. С помощью модели, построенной методом конечных элементов, произведен расчет геометрических размеров перестраиваемого СВЧ резонатора, а также селектирующего резонатора с кварцевой втулкой.

2. Впервые предложен и реализован импульсный режим работы вспомогательной магнитооптической ловушки, позволивший на 20 % увеличить число детектируемых атомов в спектроскопе по сравнению с непрерывным режимом работы.

3. На основе проведенных автором экспериментальных исследований доказана необходимость включения в состав спектроскопа дополнительной магнитооптической ловушки, обеспечивающей необходимое отношение сигнал-шум.

*Практическая значимость полученных результатов*

Полученные в диссертационной работе результаты использованы при создании двух атомных спектроскопов со вспомогательными магнитооптическими ловушками и перестраиваемыми СВЧ резонаторами, входящих в состав хранителя единиц времени и частоты на основе «фонтана» атомов рубидия государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ1-2018.

*Рекомендации по дальнейшему использованию результатов и выводов диссертационной работы*

Полученные в работе результаты целесообразно применять при разработке и серийном производстве стандартов частоты и времени «фонтанного типа» для оснащения объектов наземной инфраструктуры системы ГЛОНАСС. Кроме того, стандарты частоты и времени «фонтанного

типа» могут быть востребованы в составе вторичных эталонов единиц времени и частоты Минобороны России (ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, войсковая часть 32103), Росстандарта, а также ряда организаций оборонно-промышленного комплекса (АО «Российский институт радионавигации и времени», АО «Нижегородское НПО имени М.В. Фрунзе» и др.).

Результаты разработки перестраиваемого СВЧ резонатора могут быть использованы при создании новых типов стандартов частоты и времени отечественными предприятиями и организациями, занимающимися данным вопросом, например ЗАО «Время-Ч», г. Нижний Новгород, ФГБУН «Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук».

#### *Замечания по работе*

1. В работе не учтены результаты диссертационной работы Алейникова М.С. в части применения разработанного водородного стандарта частоты и времени для измерения нестабильности частоты рубидиевого стандарта частоты и времени «фонтанного типа».

2. В диссертационной работе не приведен расчет показателей надежности разработанного тонкостенного резонатора.

3. В работе, при описании атомных стандартов частоты фонтанного типа, одновременно используется термин «хранитель единиц времени и частоты» и «устройство воспроизведения единиц времен и частоты».

4. В диссертации и автореферате не приведены требования к градиенту температуры окружающего воздуха в диапазоне температур от 21 до 28 °С.

Отмеченные недостатки не снижают общей положительной оценки работы. Выводы, рекомендации и вынесенные на защиту основные положения достаточно обоснованы. Диссертация изложена логично и последовательно.

По теме диссертации опубликованы девять работ, в том числе 3 – в изданиях, входящих в перечень ВАК, 3 – в виде тезисов докладов конференций.

Диссертация аккуратно оформлена, содержит подробное описание основных научных результатов. **Тема и содержание диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 05.11.15 – «Метрология и метрологическое обеспечение».**

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации и достаточно полно отражает ее основные положения.

#### *Заключение*

Диссертация имеет существенное прикладное значение, как в социально-экономической сфере, так и для области обороны и безопасности государства, является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научной задачи, заключающейся в разработке и исследовании спектроскопа для атомных стандартов частоты и времени «фонтанного типа».

Диссертация написана самостоятельно, обладает внутренним единством, представляет собой законченную научную квалификационную работу, содержащую новое решение актуальной научной задачи, имеющей

теоретическое и прикладное значение. По уровню решения важной научно-технической задачи и её практической значимости диссертационная работа удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении учетных степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Купалов Дмитрий Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.15 – «Метрология и метрологическое обеспечение».

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании научно-технического совета (секция № 2) ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России (протокол № 39-18 от 18.10.2018).

Начальник 23 отдела  
кандидат технических наук  
«25» октября 2018 г.



И.Дрига

Ведущий научный сотрудник 23 отдела  
доктор технических наук, профессор  
«25» 10 2018 г.



А.Рыжков

Подписи Дриги И. и Рыжкова А. удостоверяю.  
Ответственный за кадровую работу  
в ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России  
«25» 10 2018 г.



М.Зайцев

ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России (141006, Московская обл., г. Мытищи,  
ул. Комарова, 13), тел.: 8 (495) 583-99-23, эл.почта: 32gnii@mil.ru