

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт имени П.Н. Лебедева
Российской академии наук

На правах рукописи

Мишин Денис Андреевич

Бихроматическое возбуждение часовых переходов в
атомах тулия для компенсации квадратичного эффекта
Зеемана

Специальность 1.3.19 – Лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Научный руководитель кандидат физико-математических наук
Головизин Артём Алексеевич

Официальные
оппоненты доктор физико-математических наук
Пальчиков Виталий Геннадьевич
главный научный сотрудник Главного
метеорологического центра Государственной службы
времени и частоты (ГМЦ ГСВЧ) Федерального
государственного унитарного предприятия
«Всероссийский научно-исследовательский
институт физико-технических и радиотехнических
измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»)

кандидат физико-математических наук
Афанасьев Антон Евгеньевич
старший научный сотрудник Лаборатории
лазерной спектроскопии Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
Института спектроскопии Российской Академии
Наук (ИСАН).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт лазерной физики СО
РАН, г. Новосибирск

Защита состоится 6 апреля 2026 года в 11:00 на заседании диссертационного
совета 24.1.262.01 на базе ФИАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский
проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте
института www.lebedev.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.262.01,

доктор физико-математических наук

А. С. Золотко

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена исследованию метода синтетической частоты для компенсации квадратичного эффекта Зеемана при спектроскопии часовых переходов в атомах тулия на длине волны 1140 нм. В рамках исследования проанализированы методы подготовки начальных состояний и считывания населённостей, необходимые для оценки эффективности возбуждения исследуемых переходов; особое внимание уделено схеме бихроматического опроса. Помимо демонстрации эффективности предложенного метода, в работе представлены результаты первого сличения двух оптических часов на основе атомов тулия, показавшие преимущество по сравнению с микроволновыми стандартами частоты.

Актуальность

На сегодняшний день частота является наиболее точно измеряемой физической величиной, что делает атомные часы ключевым инструментом для целого ряда метрологических задач (например, см. обзоры [1,2]). За последние десятилетия оптические часы, основанные на переходах в холодных атомах и ионах, позволили достичь относительной ошибки измерений на уровне 10^{-18} [3–6] и относительной систематической погрешности $10^{-18} - 10^{-19}$ [3,5–11], что значительно превосходит характеристики цезиевого стандарта, лежащего в основе текущего определения секунды [12,13]. Уже сегодня ведутся работы по переходу от микроволнового первичного стандарта частоты к оптическому [14], что требует не только дальнейшего повышения точности лабораторных прототипов, но и разработки методов их глобального сравнения.

В настоящее время для сличения оптических часов используются волоконно-оптические линии связи [10,15–17], обеспечивающие передачу сигнала с минимальными потерями стабильности на расстояниях до сотен километров, а также методы прямой оптической связи [17–19] в локальных сетях. Однако эти подходы неприменимы для межконтинентальных измерений, где используются спутниковые методы, связанные с глобальными навигационными системами (GNSS) [20,21] и методами двустороннего обмена сигналом (TWSTFT) [22]. Данные техники вносят дополнительную ошибку на уровне 10^{-16} в относительных единицах [23], что на несколько порядков хуже возможностей современных оптических часов.

Для решения данной проблемы необходима разработка транспортируемых оптических часов, способных сохранять метрологические характеристики вне лабораторных условий, и над этой задачей работают множество лабораторий по всему миру [24–32]. Такие системы позволяют проводить прямое сравнение эталонов в разных точках планеты без потери точности, а также откроют новые возможности для прикладных задач. В частности, транспортируемые часы критически важны для релятивистской

геодезии и гравитационного картирования, где их использование позволит измерять разности гравитационного потенциала Земли с сантиметровой точностью [3,25,28]. Кроме того, компактные стандарты частоты востребованы в фундаментальных исследованиях, включая поиск вариаций фундаментальных констант и проверку общей теории относительности.

При создании транспортируемых установок возникает выбор между двумя подходами: ионными и нейтрально-атомными системами. Стандарты, основанные на одиночных ионах, демонстрируют исключительно низкую чувствительность к внешним возмущениям [11,25,30,31,33,34], что критически важно для внелабораторных применений, в которых контроль характеристик окружающей среды ограничен. Однако принципиальное ограничение таких систем заключается в работе с малым количеством частиц, часто – единичными ионами, что приводит к фундаментальному ограничению стабильности измерений, связанному с квантовым проекционным шумом, $\sigma_{QPN}(\tau) \sim 1/\sqrt{N\tau}$, где N – количество частиц, а τ – время измерений [1,2], и необходимости длительного усреднения для достижения требуемых характеристик. Если для лабораторных применений время измерений зачастую не является критичным параметром, то для полевых прикладных задач оно является существенным.

В противоположность этому, часы на основе нейтральных атомов, захваченных в оптическую решётку, работают с ансамблями 10^4 - 10^6 атомов [4,5,35], что позволяет достигать требуемой точности измерений существенно быстрее. Однако подобные системы демонстрируют повышенную чувствительность к внешним возмущениям, в частности — что особенно критично — к тепловому излучению окружающей среды [9,35]. При комнатной температуре эффект Штарка из-за взаимодействия с тепловым излучением вызывает сдвиги частоты часовых переходов на уровне 10^{-15} в относительных единицах, что на несколько порядков превышает аналогичные возмущения в ионных системах [10,11]. Особенно критична эта проблема для транспортируемых систем, где затруднена реализация сложных криогенных экранов, используемых в лабораторных условиях.

Тулиевые часы занимают в этом контексте особое положение. С одной стороны, их часовой переход на длине волны 1.14 мкм на три порядка менее чувствителен к тепловому излучению по сравнению с системами на основе атомов стронция и иттербия [36,37]. С другой стороны, возможность работы с большими ансамблями атомов сохраняет преимущество низкого предела квантового проекционного шума по сравнению с ионными установками. Это делает атомы тулия особенно перспективными именно для создания транспортируемых оптических часов.

Несмотря на продемонстрированную низкую чувствительность к тепловому излучению, часовой переход в атомах тулия подвержен сдвигам из-за квадратичного эффекта Зеемана и взаимодействия с полем оптической

решётки. Так как ранее для этого перехода были найдены несколько магических длин волн [36–40], для которых влияние оптической решётки минимально, на текущий момент доминирующим систематическим эффектом для тулиевых оптических часов является квадратичный зеемановский сдвиг.

Ранее для различных систем были продемонстрированы методы комбинирования нескольких измеряемых частот с целью компенсации и усреднения ряда систематических эффектов [41–44]. В диссертации [45] было предложено использовать два часовых перехода между различными компонентами сверхтонкой структуры атомов тулия для формирования синтетической частоты и компенсации квадратичного эффекта Зеемана.

Целью данной работы является экспериментальная реализация и исследование бихроматического возбуждения часовых переходов в атомах тулия для компенсации квадратичного эффекта Зеемана и сличение двух тулиевых оптических часов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать и экспериментально реализовать схему подготовки начальных состояний, а также схему считывания населённостей уровней, связанных двумя часовыми переходами.
2. Осуществить возбуждение часового перехода $|4f^{13}(^2F^0)6s^2, J = 7/2, F = 3, m_F = 0\rangle \rightarrow |4f^{13}(^2F^0)6s^2, J = 5/2, F = 2, m_F = 0\rangle$.
3. Экспериментально реализовать бихроматическое возбуждение часовых переходов и продемонстрировать подавление чувствительности синтетической частоты к квадратичному эффекту Зеемана по сравнению с частотами отдельных часовых переходов.
4. Выполнить синхронное сличение двух тулиевых оптических часов с применением техники бихроматического возбуждения и формирования синтетической частоты.

Научная новизна:

1. Продемонстрирована одновременная подготовка атомов на центральных магнитных подуровнях сверхтонкой структуры основного состояния с помощью монохроматического излучения на длине волны 418.8 нм.
2. Проведена спектроскопия часового перехода $|4f^{13}(^2F^0)6s^2, J = 7/2, F = 3, m_F = 0\rangle \rightarrow |4f^{13}(^2F^0)6s^2, J = 5/2, F = 2, m_F = 0\rangle$ в ансамбле атомов, захваченных в оптическую решётку.
3. Экспериментально продемонстрировано подавление квадратичного эффекта Зеемана в атомах тулия путём формирования синтетической частоты в бихроматическом режиме опроса.
4. Предложена схема реализации непрерывных оптических часов на основе атомов тулия, захваченных в движущуюся оптическую решётку.

5. Выполнено сличение двух тулиевых оптических часов с применением техники бихроматического опроса и формирования синтетической частоты.

Практическая значимость

Реализованная методика бихроматического опроса и формирования синтетической частоты позволяет эффективно подавить доминирующий систематический эффект в тулиевых оптических часах, связанный с квадратичным зеемановским сдвигом. Данное решение является важным шагом на пути создания компактных и транспортируемых оптических стандартов частоты на атомах тулия, что открывает новые возможности для их применения в полевых условиях. Реализованный подход существенно снижает требования к магнитному экранированию и стабилизации, упрощая конструкцию мобильных установок. Проведённое прямое сличение двух тулиевых часов подтвердило их преимущество по сравнению с микроволновыми стандартами.

Методология и методы исследования

Исследования проводились экспериментально на атомах тулия, захваченных в оптическую решётку посредством прямого лазерного и микроволнового возбуждения различных переходов. Анализ данных выполнялся путём аппроксимации теоретическими моделями. Также проводилось численное моделирование ряда этапов эксперимента для оценки достижимых характеристик.

Положения, выносимые на защиту:

1. Использование одночастотной оптической накачки на длине волны 418.8 нм позволяет подготовить атомы тулия одновременно в состояниях $|4f^{13}(^2F^0)6s^2, J = 7/2, F = 4, m_F = 0\rangle$ и $|4f^{13}(^2F^0)6s^2, J = 7/2, F = 3, m_F = 0\rangle$ и достичь населённостей этих уровней 36(2)% и 3.8(0.2)% от начального количества атомов, соответственно, что является достаточным для одновременной спектроскопии двух часовых переходов.
2. Для синтетической частоты, равной полусумме частот часовых переходов $|4f^{13}(^2F^0)6s^2, J = 7/2, F = 4, m_F = 0\rangle \rightarrow |4f^{13}(^2F^0)6s^2, J = 5/2, F = 3, m_F = 0\rangle$ и $|4f^{13}(^2F^0)6s^2, J = 7/2, F = 3, m_F = 0\rangle \rightarrow |4f^{13}(^2F^0)6s^2, J = 5/2, F = 2, m_F = 0\rangle$ в атомах тулия, коэффициент квадратичного эффекта Зеемана равен -0.008(175) Гц/Гс², что как минимум на три порядка ниже чувствительности к магнитному полю каждого из переходов в отдельности.
3. При спектроскопии атомов тулия, захваченных в движущуюся оптическую решётку, с пространственным выделением зоны взаимодействия с часовым излучением посредством магнитного поля, формирование синтетической частоты во встречных пучках пробного

часового излучения позволяет подавить систематические сдвиги частоты, связанные с эффектами Зеемана и Доплера, на 3 и 5 порядков соответственно по сравнению с монохроматической схемой возбуждения.

4. В режиме синхронного опроса двух оптических часов на основе атомов тулия достижима погрешность сличения синтетических частот менее 30 мГц после 500 с усреднения.

Достоверность полученных результатов подтверждается высокой воспроизводимостью экспериментальных данных, статистической значимостью измерений, корреляцией с независимыми исследованиями других научных коллективов, а также широкой апробацией результатов на профильных конференциях и их публикацией в рецензируемых научных изданиях.

Апробация работы

Результаты работы были представлены на 6 российских и международных конференциях лично автором:

1. «Оптические часы на атомах тулия», Д.А. Мишин, Д.О. Трегубов, А.А. Головизин, Д.И. Проворченко, К.Ю. Хабарова, В.Н. Сорокин, Н.Н. Колачевский, XI семинар Д.Н.Клышко, 8-10 июня 2022 г.
2. «Compact experimental setup for optical clock on thulium atoms», D.A. Mishin, D.I. Provorchenko, M.O. Yaushev, D.O. Tregubov, A.A. Golovizin, N.N. Kolachevsky, VI international conference on ultrafast optical science, UltrafastLight-2022, October 3-7, 2022.
3. «Progress on Compact Setup of Thulium Optical Lattice Clock», D. Mishin, A. Golovizin, D. Tregubov, D. Provorchenko, N Kolachevsky, 30th Annual International Laser Physics Workshop, July 18-22, 2022.
4. «Непрерывная спектроскопия часового перехода в атомах тулия, захваченных в оптическую решётку», Д.А. Мишин, Д.И. Проворченко, Д.О. Трегубов, М.О. Яушев, К.Ю. Хабарова, В.Н. Сорокин, Н.Н. Колачевский, А.А. Головизин, Всероссийская научная конференция с международным участием «Физика ультрахолодных атомов – 2022», 19-21 декабря 2022 г.
5. «Анализ сверхтонкой структуры основного и часового уровней в атомах тулия», Мишин Д.А., Проворченко Д.И., Трегубов Д.О., Колачевский Н.Н., Головизин А.А., Одиннадцатая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2025), 21-25 апреля 2025 г.
6. «Hyperfine structure of thulium atoms in optical clocks and quantum computing implementations», D. Mishin, D. Provorchenko, D. Tregubov, N. Kolachevsky, A. Golovizin, VIII International conference on quantum technologies (ICQT-2025), July 21-25, 2025.

Личный вклад. Все изложенные в диссертации результаты получены лично автором или при его непосредственном участии. В частности, им была собрана оптическая схема, предназначенная для реализации оптической накачки на длине волны 418.8 нм, реализована система цифровой стабилизации частоты лазерного источника и проведена оптимизация параметров подготовки начальных состояний. Автор также модифицировал метод считывания количества атомов в различных состояниях для измерения вероятностей возбуждения часовых переходов. Все основные эксперименты, связанные с микроволновым излучением и исследованием сверхтонкой структуры атомов тулия, были выполнены лично автором, как и численное моделирование эксперимента (включая анализ концепции непрерывных оптических часов). Также автор собрал оптическую обвязку для реализации бихроматического возбуждения часовых переходов в двух системах и обрабатывал результаты экспериментов по компенсации квадратичного эффекта Зеемана и синхронному сличению двух экспериментальных установок.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 5 публикациях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Список работ приведён на страницах 17-18.

Содержание работы

Введение содержит анализ текущего состояния области прецизионной метрологии, обоснование актуальности работы и формулировку научной проблемы. В нём приведены аргументы в пользу выбора атомов тулия для исследований и описано исходное состояние эксперимента. В качестве ключевой задачи определена необходимость подавления квадратичного эффекта Зеемана; кратко представлен метод её решения с использованием возбуждения двух часовых переходов.

Первая глава диссертации посвящена разработке и характеристике методов возбуждения и считывания часовых переходов.

В пункте 1.1 подробно описана структура энергетических уровней атомов тулия, используемых в эксперименте. Приведены краткие сведения о структуре основного $|4f^{13}(^2F^0)6s^2, J = 7/2\rangle$ (далее для краткости $|g\rangle$) и часового $|4f^{13}(^2F^0)6s^2, J = 5/2\rangle$ (далее для краткости $|c\rangle$) уровней в атомах тулия [46–48]. Рассмотрены все используемые на текущий момент стадии лазерного охлаждения [49–53], и представлен краткий обзор предыдущих результатов исследования часового перехода на длине волны 1140 нм $|g, F = 4, m_F = 0\rangle \rightarrow |c, F = 3, m_F = 0\rangle$ (далее для краткости переход «4-3») [37,48] с построением бюджета ошибок [45,54], см. Таблица 1.

Таблица 1 Бюджет ошибок часового перехода «4-3» в атомах тулия, введены величины систематического сдвига $\Delta\nu_{43}$ и неточности $\delta\nu_{43}$

Источник	$\Delta\nu_{43}$, мГц	$\delta\nu_{43}$, мГц	условия
Тепловое излучение	-0.6	0.3	$T = 295 \pm 3$ К, неточность обусловлена погрешностью измерения $\Delta\alpha^s(0)$ [37]
Оптическая решётка	$ \Delta\nu_{43}^{\text{lat}} < 10$	< 2	$\delta U_{\text{lat}}/U_{\text{lat}} \leq 0.1$, $U_{\text{lat}} \sim 100E_{\text{rec}}$, неточность связана с мультипольными поляризуемостями [38] и требует дальнейших исследований
Линейный эффект Зеемана	0	0	для спектроскопии переходов между подуровнями $m_F = 0$
Квадратичный эффект Зеемана	2572	1	$B_0 = 100 \pm 0.02$ мГс, необходима высокая точность калибровки [55]

Для компенсации лидирующего вклада квадратичного эффекта Зеемана предложено дополнительно возбуждать часовой переход между другими компонентами сверхтонкой структуры $|g, F = 3, m_F = 0\rangle \rightarrow |c, F = 2, m_F = 0\rangle$ (далее - переход «3-2»). Из формулы Брейта-Раби можно показать, что данный переход обладает противоположной чувствительностью к данному эффекту ($\beta_{32} = -\beta_{43}$, где β – коэффициент квадратичного эффекта Зеемана). В результате синтетическая частота, определяемая как полусумма частот переходов «4-3» и «3-2», становится нечувствительна к квадратичному эффекту Зеемана в магнитном поле B_0

$$\Delta\nu_s^{qz} = \frac{\Delta\nu_{43}^{qz} + \Delta\nu_{32}^{qz}}{2} = \frac{\beta_{43} + \beta_{32}}{2} B_0^2 = 0. \quad (1)$$

Особое внимание в главе уделено возможности бихроматического возбуждения двух часовых переходов. Реализация данного подхода требует одновременной подготовки атомов в двух начальных состояниях $|g, F = 4, m_F = 0\rangle$ и $|g, F = 3, m_F = 0\rangle$, что предложено осуществить с помощью оптической накачки излучением на длине волны 418.8 нм [56]. Методы считывания населённостей указанных уровней детально рассмотрены в последующих разделах диссертации.

В пункте 1.2 кратко описаны ключевые элементы экспериментальной установки, использовавшейся в ходе исследований [36,44,59]. Приведены основные оптические схемы и методы работы с лазерными системами, предназначенными для возбуждения необходимых переходов и формирования оптической решётки на длине волны 1064 нм, близкой к магической [37,38]. Также представлена схема формирования лазерных пучков для

одновременного возбуждения двух часовых переходов и обеспечения независимого контроля их частот с помощью акустооптических модуляторов.

Пункт 1.3 посвящён характеристике метода измерения количества атомов: приведена калибровка используемой CMOS-камеры (п. 1.3.1) и описана техника считывания населённости уровня $|g, F = 3\rangle$ с использованием перекачивающего излучения на длине волны 410.6 нм (п. 1.3.2).

В пункте 1.4 приведён подробный анализ подготовки начальных состояний с использованием оптической накачки излучением на длине волны 418.8 нм. Значение сверхтонкого расщепления уровня $|4f^{12}(^3F_4)5d_{5/2}6s^2, J = 7/2\rangle$ (далее для краткости $|p\rangle$), использующегося для этого процесса, всего на 85 МГц меньше расщепления основного состояния при естественной ширине линии порядка 10 МГц, что позволяет возбуждать накачивающие переходы $|g, F = 4\rangle \rightarrow |p, F = 4\rangle$ и $|g, F = 3\rangle \rightarrow |p, F = 3\rangle$ с помощью монохроматического излучения и одновременно готовить атомы в двух начальных состояниях. Результаты моделирования изложены в пункте 1.4.1, а полученные экспериментальные данные представлены в пункте 1.4.2. Эффективность подготовки состояний $|g, F = 4, m_F = 0\rangle$ и $|g, F = 3, m_F = 0\rangle$ оценивалась по глубине провала при спектроскопии часового излучения через резонанс соответствующего перехода (см. Рис. 1). Приведённые результаты также являются первым детектированием фурье-ограниченного контура часового перехода «3-2» в облаке атомов, захваченном в оптическую решётку.

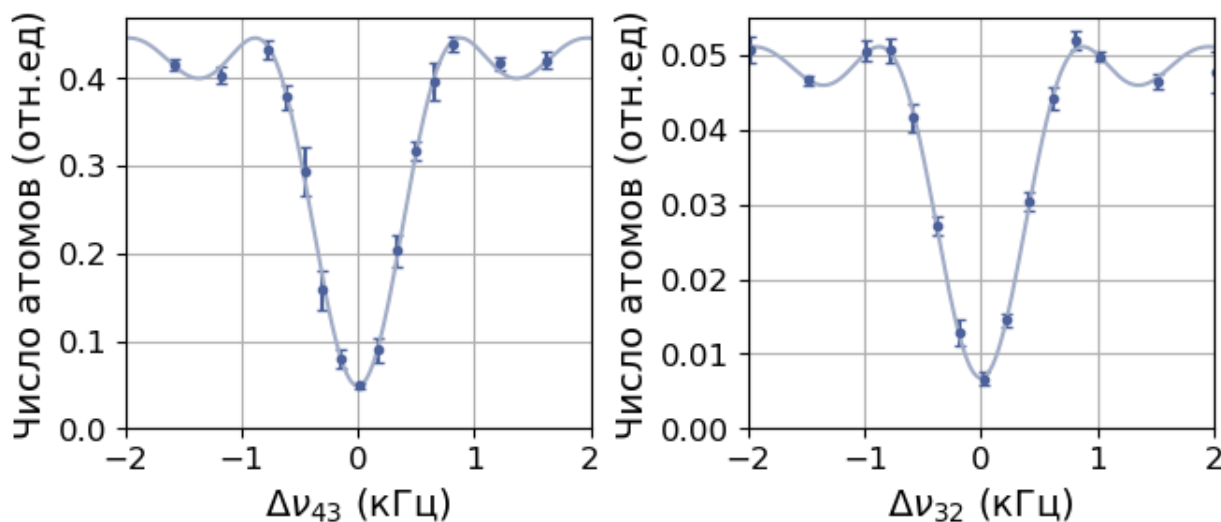


Рис. 1 Результаты спектроскопии часовых переходов. Сигнал нормирован на полное количество атомов, полученное в эксперименте без оптической накачки.

Дальнейший анализ процесса оптической накачки, направленный на оптимизацию её параметров (см. Рис. 2), позволил достичь эффективности подготовки начальных состояний на уровне $\eta_{4,0} = 36(2)\%$ и $\eta_{3,0} = 3.8(0.2)\%$ (процент берётся от начального количества атомов без применения оптической накачки) с чистотой поляризации порядка 90%. Это соответствует примерно

$140(8) \times 10^3$ и $15(0.8) \times 10^3$ атомов на подуровнях $|g, F = 4, m_F = 0\rangle$ и $|g, F = 3, m_F = 0\rangle$ соответственно. Полученные результаты демонстрируют, во-первых, достаточную для спектроскопии двух часовых переходов эффективность подготовки начальных состояний и, во-вторых, устойчивость процесса к флуктуациям частоты и мощности накачивающего излучения.

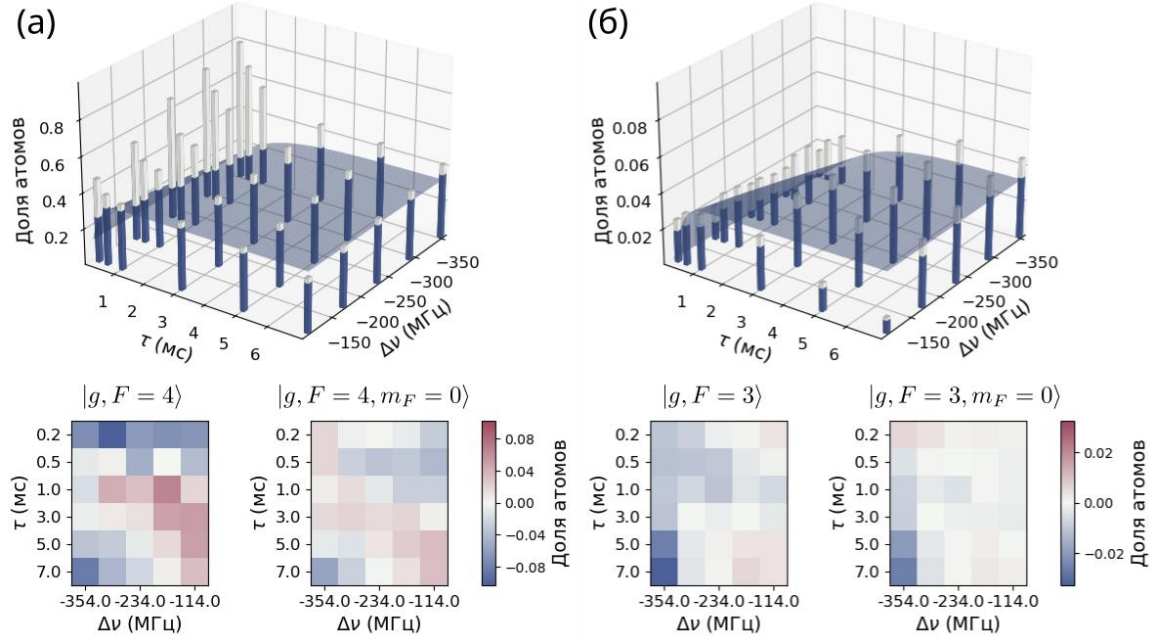


Рис. 2 Эффективность оптической накачки на уровнях $|g, F = 4\rangle$ (а) и $|g, F = 3\rangle$ (б) в зависимости от длительности импульса и отстройки излучения по частоте (относительно резонанса с переходом $|g, F = 4\rangle \rightarrow |p, F = 4\rangle$). Серые столбцы – полная населённость сверхтонкого состояния, синие – количество атомов на центральном магнитном подуровне, результаты нормированы на полное количество атомов в отсутствие накачки. Голубая поверхность – результаты приближения моделью с учётом потерь атомов из-за нагрева, вставки ниже – отличие экспериментальных результатов от предсказания модели.

Заключительный раздел первой главы (п. 1.5) посвящён переходу от детектирования провала в населённости основного уровня к схеме, регистрирующей атомы как на основных, так и на возбуждённых часовых уровнях с использованием дополнительных коротких π -импульсов часового излучения [57]. Учёт конечного времени жизни часового уровня и асимметрии распада двух часовых состояний потребовал предварительной калибровки системы считывания. Калибровка рассчитывалась по спектроскопии часовых переходов исходя из предположения, что полное количество атомов в эксперименте не зависит от частоты часового излучения. Результаты, представленные на Рис. 3, подтверждают возможность независимого детектирования эффективности возбуждения двух часовых переходов за один цикл измерений при их бихроматическом возбуждении.

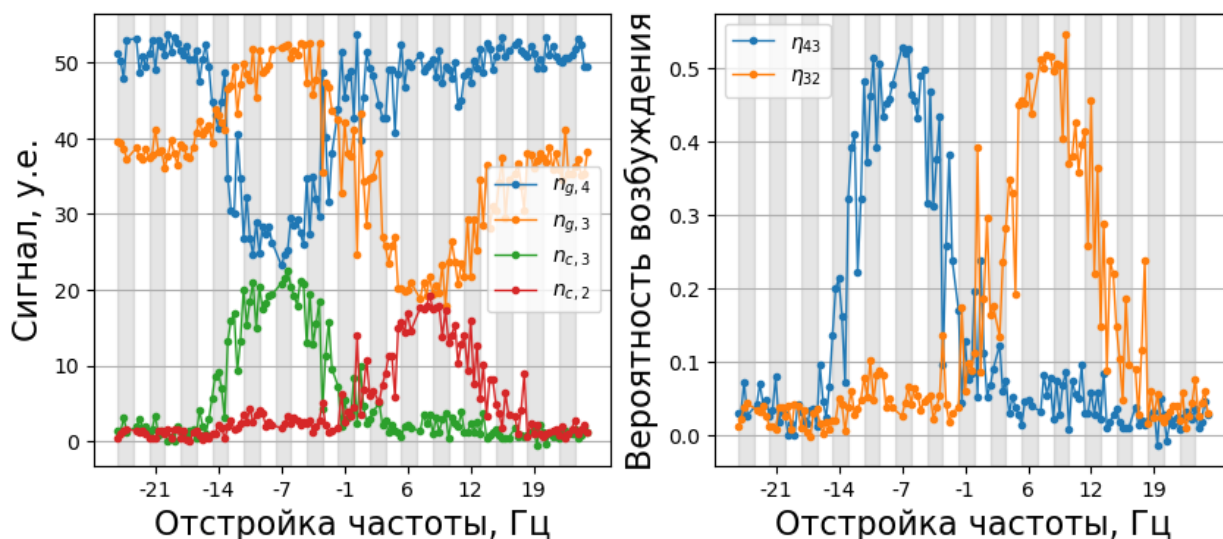


Рис. 3 Бихроматическое возбуждение часовых переходов. Демонстрация эффективности используемого метода калибровки считывания: слева представлена зависимость сигнала считывания при сканировании частот часовых переходов, справа – рассчитанные вероятности возбуждения.

Таким образом, в первой главе описаны основные техники подготовки начальных состояний и считывания населённостей необходимых уровней, а также экспериментально продемонстрировано бихроматическое возбуждение двух часовых переходов в атомах тулия.

Вторая глава посвящена реализации метода компенсации квадратичного эффекта Зеемана.

В пункте 2.1 приведено подробное теоретическое рассмотрение взаимодействия атома тулия с магнитным полем (п. 2.1.1) и электрическим полем оптической решётки (п. 2.1.2).

Пункт 2.2 посвящён анализу экспериментальных результатов методом дисперсии Аллана (п. 2.2.1) и описанию разработанной системы долговременной цифровой стабилизации частоты излучения к часовым переходам в атомах тулия и проверке её работоспособности (п. 2.2.2). Также в этом пункте изложена процедура использования данной системы для параллельной стабилизации и определения резонансных частот при различных параметрах эксперимента.

В пункте 2.3 изложены методы контроля магнитного поля. На основе разработанной методики цифровой стабилизации частот предложена схема стабилизации направления магнитного поля (п. 2.3.1), что критически важно для прецизионного анализа чувствительности синтетической частоты к магнитному полю из-за тензорной поляризуемости атомов. Калибровка магнитного поля в эксперименте с помощью σ^{\pm} часовых переходов с учётом указанных выше эффектов описана в п. 2.3.2.

Результаты компенсации квадратичного эффекта Зеемана приведены в пункте 2.4. В каждом эксперименте проводилась параллельная стабилизация частот излучения к часовым переходам при двух магнитных полях: опорном $B_0^r = 218$ мГс и основном B_0^m , варьируемом в диапазоне 130-520 мГс. Для каждой пары полей (B_0^r , B_0^m) определялась разница частот переходов «4-3» и «3-2» в отдельности, а также разница синтетических частот. Результаты, приведенные на Рис. 4, демонстрируют, что для синтетической частоты чувствительность к магнитному полю составила $\beta_s = -0.008(175)$ Гц/Гс², что как минимум на 3 порядка ниже чувствительности каждого из часовых переходов в отдельности, $\beta_{43} = 257.47(22)(75)$ Гц/Гс² и $\beta_{32} = -257.42(18)(75)$ Гц/Гс². Погрешность в первых скобках связана с ошибкой аппроксимации результатов квадратичной функцией, во вторых скобках – с неточностью калибровки магнитного поля.

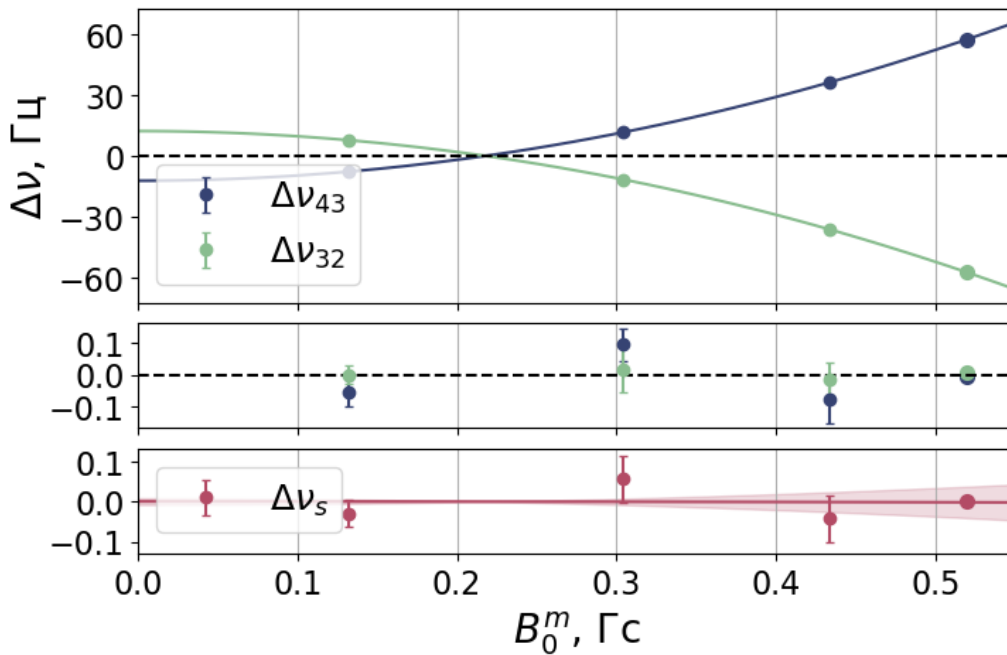


Рис. 4 Зависимость сдвигов частоты от магнитного поля. На верхнем графике представлены $\Delta\nu_{43}$, $\Delta\nu_{32}$, результаты приближены параболическими зависимостями (сплошные линии). На среднем графике показаны отличия данного приближения от экспериментальных результатов. На нижнем графике представлены результаты для синтетической частоты и приближение параболической зависимостью (сплошная линия). Закрашенная область иллюстрирует ошибку фита параболической функцией. Все представленные кресты ошибок соответствуют статистической неточности 1σ , рассчитанной из девиации Аллана.

В пункте 2.5 приводится анализ применимости предложенного метода бихроматической спектроскопии для реализации непрерывных оптических часов на основе атомов, захваченных в движущуюся оптическую решётку. В пункте 2.5.1 обоснован переход к схеме непрерывных оптических часов для улучшения стабильности за счёт подавления эффекта Дика [58]. Также описана концепция выделения области взаимодействия с часовым излучением с помощью магнитного поля, предложенная Хидетоши Катори в 2021 году [59].

В пункте 2.5.2 проанализировано расширение техники бихроматического возбуждения и формирования синтетической частоты во встречных пучках часового излучения для атомов тулия в движущейся решётке. Показано, что её применение в предлагаемой концепции непрерывных часов позволяет подавить характерные сдвиги частоты, связанные с эффектами Зеемана и Доплера, более чем на 3 и 5 порядков соответственно.

Таким образом, во **второй главе** экспериментально продемонстрирована эффективность предложенного метода бихроматической спектроскопии и формирования синтетической частоты для компенсации квадратичного эффекта Зеемана. Кроме того, показан высокий потенциал применения данного метода в новой для области оптических часов конфигурации.

Третья глава посвящена сличению двух тулиевых оптических часов с использованием техники бихроматического опроса и формирования синтетической частоты.

Пункт 3.1 посвящён описанию двух экспериментальных установок, между которыми проводилось сличение: «основной» (использовавшейся в описанных ранее исследованиях) и «компактной», включающей ряд модификаций, направленных на создание транспортируемых оптических часов. В данном разделе также представлена схема независимого управления частотами лазерного излучения для каждой из систем и описана процедура синхронизации измерений.

В пункте 3.2 представлены результаты численного моделирования. В пункте 3.2.1 изложены основные параметры модели, а в пункте 3.2.2 приведены результаты моделирования сличения двух систем и анализа влияния различных источников шумов.

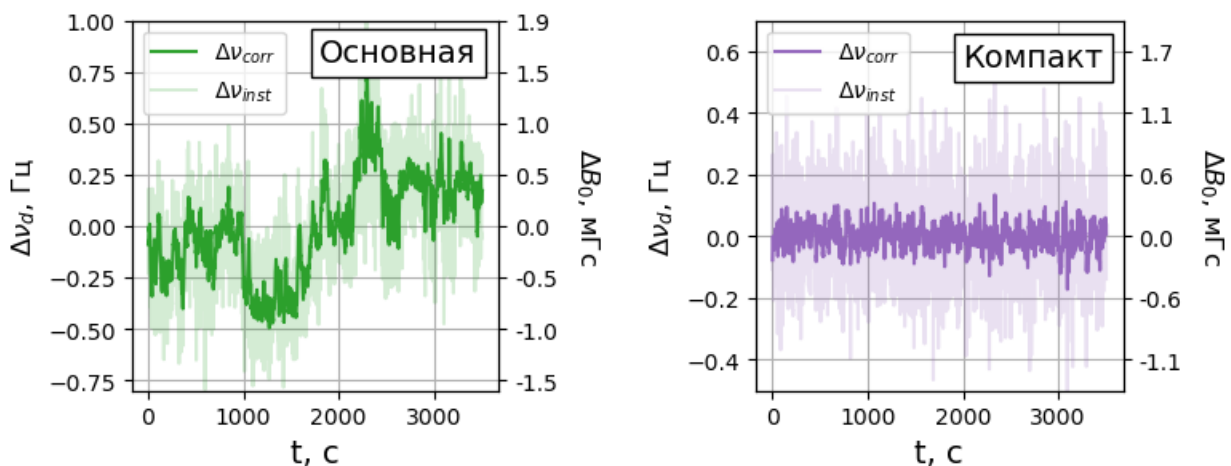


Рис. 5 Результаты измерения дифференциальных частот в каждой из систем. Светлые точки соответствуют измеренным мгновенным флуктуациям частоты, темные – вносимым корректировкам в системе стабилизации. Левая ось иллюстрирует значение разности частот, правая – расчётные флуктуации магнитного поля, которые приводят к соответствующим флуктуациям частоты.

Результаты сличения двух экспериментальных установок в течение одного часа представлены в пункте 3.3. В первую очередь была проанализирована динамика количества атомов на каждой из систем и индивидуальное поведение частот часовых переходов, подтвердившие достаточную стабильность условий эксперимента. На следующем шаге для каждой из систем строилась и анализировалась дифференциальная частота, равная разности частот двух часовых переходов $\nu_d = \nu_{32} - \nu_{43}$. Поскольку все часовые переходы возбуждаются одновременно, данная частота нечувствительна к ряду шумов лазерного источника, но несёт информацию о величине магнитного поля в эксперименте, так как подвержена квадратичному эффекту Зеемана (см. Рис. 5). Полученные результаты продемонстрировали существенно более высокую стабильность магнитного поля в компактной установке по сравнению с основной системой, где значение корректировки дифференциальной частоты соответствует флуктуациям магнитного поля на уровне 1 мГц.

На финальном шаге для каждой из систем была проанализирована динамика синтетической частоты, а также проведено сравнение полученных частот между системами. Результаты, представленные на Рис. 6, демонстрируют, что расхождение синтетических частот между системами: 1) не подвержено дрейфу частоты лазерного источника, наблюдаемого на каждой из систем в отдельности и 2) не подвержено выявленным ранее флуктуациям магнитного поля в основной системе.

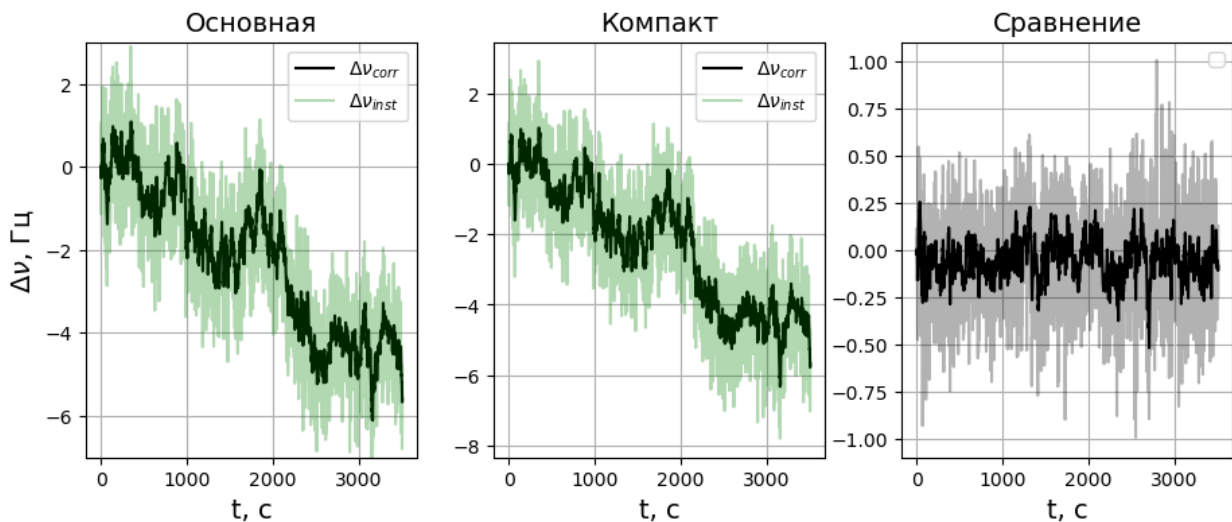


Рис. 6 Результаты измерения синтетических частот на каждой из систем и их сравнение. Представлены результаты мгновенных измеренных частотных отстроек ($\Delta\nu_{inst}$) и вносимых корректировок ($\Delta\nu_{corr}$).

Девиация Аллана проведённых измерений представлена на Рис. 7. Фиолетовым и зелёным цветами показаны результаты измерений дифференциальных частот на каждой из систем в отдельности, синим и оранжевым — расхождение частот переходов «4-3» и «3-2» между установками, красным — расхождение синтетических частот. Измерения

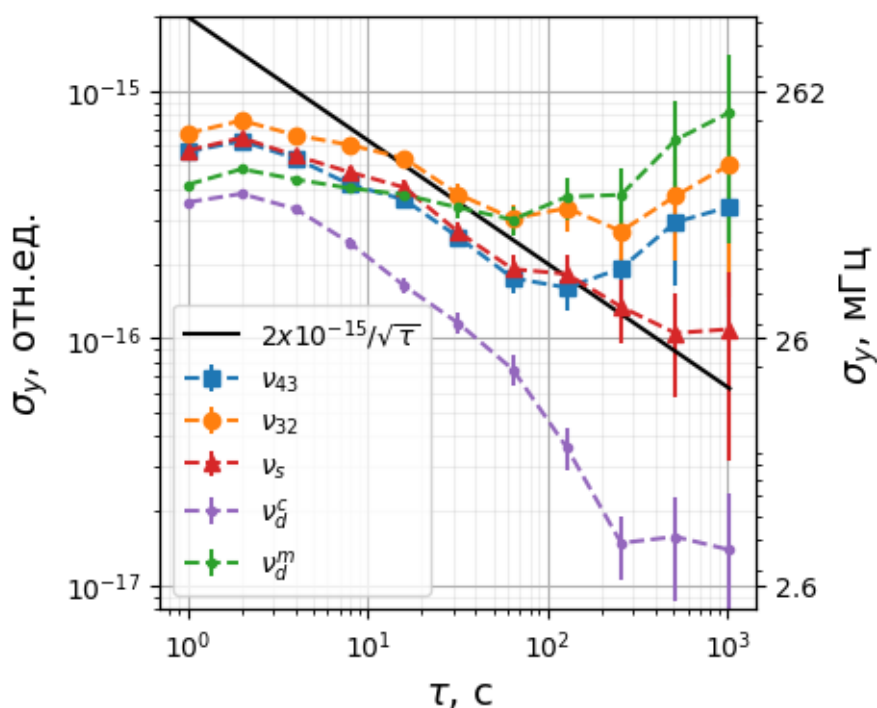


Рис. 7 Девияция Аллана для проведённого сличения: синими и оранжевыми точками отражены результаты сравнения частот каждого из переходов «4-3» и «3-2» в отдельности, красными точками – результаты сравнения синтетической частоты между системами. Фиолетовые и зелёные точки соответствуют результатам измерения дифференциальной частоты на компактной и основной системах соответственно. Чёрная сплошная линия иллюстрирует приближение результатов усреднения синтетической частоты на времени после 100 с зависимостью $\sigma_y = 2 \times 10^{-15} / \sqrt{\tau}$.

демонстрируют, что после 100 с усреднения девиация Аллана для сравнения частот отдельных переходов начинает расти. Это связано с флуктуациями магнитного поля на основной системе и также отражается на соответствующей дифференциальной частоте. В то же время девиация сличения синтетических частот продолжает падать после 100 с и достигает относительного уровня 10^{-16} через 500 с усреднения, что вновь подтверждает перспективность техники синтетической частоты для применения в тулиевых оптических часах. При этом ошибка дифференциальной частоты на компактной системе за 200 с усредняется до относительного уровня 2×10^{-17} , что свидетельствует о высокой стабильности магнитного поля и низком уровне остаточных систематических эффектов. Этот результат позволяет прогнозировать достижение сопоставимой точности характеристики тулиевых оптических часов в компактном исполнении.

Результаты третьей главы демонстрируют, что разрабатываемые оптические часы на основе атомов тулия уже превосходят микроволновые стандарты частоты, которые для достижения относительной нестабильности на уровне 10^{-16} требуют более суток усреднения, в то время как для тулиевых оптических часов с применением синтетической частоты этот уровень был достигнут менее чем за 10 минут.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Разработана схема одновременной монохроматической подготовки начальных состояний методом оптической накачки на длине волны 418.8 нм и достигнуты населённости целевых состояний $\eta_{4,0} = 36(2)\%$ и $\eta_{3,0} = 3.8(0.2)\%$ от начального количества атомов.
2. Реализован метод считывания населённостей 4-х уровней, использующихся при бихроматическом опросе часовых переходов, что позволяет за один экспериментальный цикл рассчитать вероятности возбуждения двух часовых переходов, нечувствительные к флуктуациям полного количества атомов в эксперименте.
3. Разработана техника цифровой стабилизации, и продемонстрирована её эффективность как для стабилизации частоты лазерного излучения к резонансам в атомах, так и для стабилизации параметров системы, определяемых в ходе эксперимента.
4. Экспериментально продемонстрирована эффективность техники бихроматического опроса и формирования синтетической частоты для компенсации квадратичного эффекта Зеемана: остаточный коэффициент составил $\beta_s = -0.008(175) \text{ Гц/Гс}^2$, что как минимум на 3 порядка ниже чувствительности каждого из часовых переходов в отдельности.
5. Предложена конфигурация непрерывных оптических часов на основе атомов тулия, захваченных в движущуюся оптическую решётку, с использованием бихроматической спектроскопии во встречных пучках часового излучения. Показано, что данная техника позволяет подавить характерные для конфигурации сдвиги, связанные с эффектами Зеемана и Доплера на 3 и 5 порядков соответственно.
6. Проведено первое сличение двух тулиевых оптических часов. В измерениях продемонстрирована долговременная нестабильность сличения синтетических частот на уровне $\sigma_y = 2 \times 10^{-15}/\sqrt{\tau}$ и достигнута относительная погрешность измерений 10^{-16} после 500 с усреднения, что превосходит характеристики микроволновых стандартов.

Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus:

1. Fedorova, E, Golovizin, A, Tregubov, D, Mishin, D, Provorchenko, D, Sorokin, V, Khabarova, K and Kolachevsky, N, Simultaneous preparation of two initial clock states in a thulium optical clock //Physical Review A. – 2020. – Т. 102. – №. 6. – С. 063114.

2. Golovizin, A. A., Tregubov, D. O., Fedorova, E. S., Mishin, D. A., Provorchenko, D. I., Khabarova, K. Y., Sorokin, V. N. and Kolachevsky, N. N. Simultaneous bicolor interrogation in thulium optical clock providing very low systematic frequency shifts //Nature communications. – 2021. – Т. 12. – №. 1. –С. 5171.
3. Mishin, D., Provorchenko, D., Tregubov, D., Kolachevsky, N., and Golovizin, A. Continuous operation of a bicolor thulium optical lattice clock //Applied Physics Express. – 2021. – Т. 14. – №. 11. –С. 112006.
4. Трегубов, Д. О., Проворченко, Д. И., Мишин, Д. А., Колачевский, Н. Н., Головизин, А. А. Оптимизация параметров петель обратной связи в оптических часах на атомах тулия при синхронном сличении//Журнал экспериментальной и теоретической физики. –2023. –Т. 164. –№. 2. –С. 223-229.
5. Головизин, А. А., Мишин, Д. А., Проворченко, Д. И., Трегубов, Д. О., и Колачевский, Н. Н. Сличение двух оптических часов на атомах тулия с использованием синхронного опроса //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. –2024. –Т. 119. –№. 9. –С. 645-650.

Список литературы

1. Riehle F. Frequency standards: basics and applications. John Wiley & Sons, 2006.
2. Ludlow A. D., Boyd M. M., Ye J., и др. Optical atomic clocks // Rev. Mod. Phys. American Physical Society, 2015. Т. 87, № 2. С. 637.
3. McGrew W. F., Zhang X., Fasano R. J., и др. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level // Nature. Nature Publishing Group, 2018. Т. 564, № 7734. С. 87–90.
4. Oelker E., Hutson R. B., Kennedy C. J., и др. Demonstration of 4.8×10^{-17} stability at 1 s for two independent optical clocks // Nat. Photonics. Nature Publishing Group, 2019. Т. 13, № 10. С. 714–719.
5. Bloom B. J., Nicholson T. L., Williams J. R., и др. An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10-18 level // Nature. Nature Publishing Group, 2014. Т. 506, № 7486. С. 71–75.
6. Kim K., Aepli A., Warfield W., и др. Atomic Coherence of 2 Minutes and Instability of 1.5×10^{-18} at 1 s in a Wannier-Stark Lattice Clock // Phys. Rev. Lett. American Physical Society, 2025. Т. 135, № 10. С. 103601.
7. Aepli A., Kim K., Warfield W., и др. Clock with 8×10^{-19} Systematic Uncertainty // Phys. Rev. Lett. American Physical Society, 2024. Т. 133, № 2. С. 023401.
8. Marshall M. C., Castillo D. A. R., Arthur-Dworschack W. J., и др. High-Stability Single-Ion Clock with 5.5×10^{-19} Systematic Uncertainty // Phys. Rev. Lett. American Physical Society (APS), 2025. Т. 135, № 3. С. 033201.

9. Bothwell T., Kedar D., Oelker E., и др. JILA SrI optical lattice clock with uncertainty of 2.0×10^{-18} // *Metrologia*. IOP Publishing, 2019. Т. 56, № 6. С. 065004.
10. Dörscher S., Huntemann N., Schwarz R., и др. Optical frequency ratio of a $^{171}\text{Yb}^+$ single-ion clock and a ^{87}Sr lattice clock // *Metrologia*. IOP Publishing, 2021. Т. 58, № 1. С. 015005.
11. Brewer S. M., Chen J. S., Hankin A. M., и др. $\text{Al}^+ 27$ Quantum-Logic Clock with a Systematic Uncertainty below 10^{-18} // *Phys. Rev. Lett.* American Physical Society, 2019. Т. 123, № 3. С. 033201.
12. Gerginov V., Hoth G. W., Heavner T. P., и др. Accuracy evaluation of primary frequency standard NIST-F4 // *Metrologia*. IOP Publishing, 2025. Т. 62, № 3. С. 035002.
13. Zheng F., Chen W., Liu K., и др. Uncertainty evaluation of the caesium fountain primary frequency standard NIM6 // *Metrologia*. IOP Publishing, 2025. Т. 62, № 3. С. 035005.
14. Dimarcq N., Gertsvolf M., Miletì G., и др. Roadmap towards the redefinition of the second // *Metrologia*. IOP Publishing, 2024. Т. 61, № 1. С. 012001.
15. Kudeyarov K. S., Kryuchkov D. S., Vishnyakova G. A., и др. Frequency transfer via an ultra-stable free-space link // *Quantum Electron.* IOP Publishing, 2020. Т. 50, № 3. С. 267–271.
16. Predehl K., Grosche G., Raupach S. M. F., и др. A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place // *Science*. American Association for the Advancement of Science, 2012. Т. 336, № 6080. С. 441–444.
17. Beloy K., Bodine M. I., Bothwell T., и др. Frequency ratio measurements at 18-digit accuracy using an optical clock network // *Nature*. Nature Research, 2021. Т. 591, № 7851. С. 564–569.
18. Gozzard D. R., Schediwy S. W., Stone B., и др. Stabilized Free-Space Optical Frequency Transfer // *Phys. Rev. Appl.* American Physical Society, 2018. Т. 10, № 2. С. 024046.
19. Riehle F. Optical clock networks // *Nat. Photonics*. Nature Publishing Group, 2017. Т. 11, № 1. С. 25–31.
20. Lyu D., Zeng F., Ouyang X., и др. Real-time clock comparison and monitoring with multi-GNSS precise point positioning: GPS, GLONASS and Galileo // *Adv. Sp. Res.* Pergamon, 2020. Т. 65, № 1. С. 560–571.
21. Petit G. Sub- 10^{-16} accuracy GNSS frequency transfer with IPFP // *GPS Solut.* Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021. Т. 25, № 1. С. 22.
22. Fujieda M., Yang S. H., Gotoh T., и др. Advanced Satellite-Based Frequency Transfer at the 10^{-16} Level // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. Т. 65, № 6. С. 973–978.
23. Riedel F., Al-Masoudi A., Benkler E., и др. Direct comparisons of European primary and secondary frequency standards via satellite techniques //

- Metrologia. IOP Publishing, 2020. T. 57, № 4. C. 045005.
24. Zeng M., Huang Y., Zhang B., и др. Towards a transportable Ca + optical clock with a systematic uncertainty of 4.8×10^{-18} // Phys. Rev. Appl. 2023. T. 19, № 6. C. 064004.
 25. Huang Y., Zhang H., Zhang B., и др. Geopotential measurement with a robust, transportable Ca⁺ optical clock // Phys. Rev. A. American Physical Society, 2020. T. 102, № 5. C. 050802.
 26. Origlia S., Pramod M. S., Schiller S., и др. Towards an optical clock for space: Compact, high-performance optical lattice clock based on bosonic atoms // Phys. Rev. A. American Physical Society, 2018. T. 98, № 5. C. 053443.
 27. Kong D.-H., Wang Z.-H., и др. A transportable optical lattice clock at the National Time Service Center // Chinese Phys. B. IOP Publishing, 2020. T. 29, № 7. C. 070602.
 28. Grotti J., Koller S., Vogt S., и др. Geodesy and metrology with a transportable optical clock // Nat. Phys. Nature Publishing Group, 2018. T. 14, № 5. C. 437–441.
 29. Ohmae N., Takamoto M., Takahashi Y., и др. Transportable Strontium Optical Lattice Clocks Operated Outside Laboratory at the Level of 10^{-18} Uncertainty // Adv. Quantum Technol. John Wiley and Sons Inc, 2021. T. 4, № 8. C. 2100015.
 30. Stuhler J., Abdel Hafiz M., Arar B., и др. Opticlock: Transportable and easy-to-operate optical single-ion clock // Meas. Sensors. Elsevier, 2021. T. 18. C. 100264.
 31. Khabarova K., Kryuchkov D., Borisenko A., и др. Toward a New Generation of Compact Transportable Yb⁺ Optical Clocks // Symmetry. MDPI, 2022. T. 14, № 10. C. 2213.
 32. Dube P., Kato K., Bernard J., и др. Progress Towards a Transportable and High-Accuracy Sr⁺ Ion Clock at NRC // 2021 Jt. Conf. Eur. Freq. Time Forum IEEE Int. Freq. Control Symp. EFTF/IFCS 2021 - Proc. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. C. 1–2.
 33. Huang Y., Zhang B., Zeng M., и др. A liquid nitrogen-cooled Ca + optical clock with systematic uncertainty of 3×10^{-18} // Phys. Rev. Appl. 2022. T. 17, № 3. C. 034041.
 34. Hannig S., Pelzer L., Scharnhorst N., и др. Towards a transportable aluminium ion quantum logic optical clock // Rev. Sci. Instrum. American Institute of Physics Inc., 2019. T. 90, № 5. C. 053204.
 35. McGrew W. F., Zhang X., Fasano R. J., и др. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level // Nature. 2018. T. 564, № 7734. C. 87–90.
 36. Sukachev D., Fedorov S., Tolstikhina I., и др. Inner-shell magnetic dipole transition in Tm atoms: A candidate for optical lattice clocks // Phys. Rev. A. 2016. T. 94, № 2. C. 022512.
 37. Golovizin A., Fedorova E., Tregubov D., и др. Inner-shell clock transition in atomic thulium with a small blackbody radiation shift // Nat. Commun. Nature

- Publishing Group, 2019. Т. 10, № 1. С. 1724.
38. Mishin D. A., Provorchenko D. I., Tregubov D. O., и др. Effect of optical lattice field on characteristics of a clock transition in thulium atoms // *Quantum Electronics*. 2022. Т. 52, № 6. С. 505–512.
 39. Katori H., Takamoto M., Pal'chikov V. G., и др. Ultrastable optical clock with neutral atoms in an engineered light shift trap // *Phys. Rev. Lett. American Physical Society*, 2003. Т. 91, № 17. С. 173005.
 40. Katori H., Hashiguchi K., Il'Inova E. Y., и др. Magic wavelength to make optical lattice clocks insensitive to atomic motion // *Phys. Rev. Lett. American Physical Society*, 2009. Т. 103, № 15. С. 153004.
 41. Yudin V. I., Taichenachev A. V., Okhapkin M. V., и др. Atomic clocks with suppressed blackbody radiation shift // *Phys. Rev. Lett. American Physical Society*, 2011. Т. 107, № 3. С. 030801.
 42. Yudin V. I., Taichenachev A. V., Basalaeв M. Y., и др. Combined atomic clock with blackbody-radiation-shift-induced instability below 10–19 under natural environment conditions // *New J. Phys. IOP Publishing*, 2021. Т. 23, № 2. С. 023032.
 43. Akerman N., Ozeri R. Atomic combination clocks // *New J. Phys. IOP Publishing*, 2018. Т. 20, № 12. С. 123026.
 44. Schiller S., Bakalov D., Korobov V. I. Simplest Molecules as Candidates for Precise Optical Clocks // *Phys. Rev. Lett. American Physical Society*, 2014. Т. 113, № 2. С. 023004.
 45. Трегубов Д. Часовой переход в атоме тулия с низкой чувствительностью к тепловому излучению: дис. ... канд. физ.-мат. наук / Трегубов Д.О. - ФИАИ, 2019.
 46. Mishin D., Tregubov D., Kolachevsky N., и др. Combined microwave and optical spectroscopy for hyperfine structure analysis in thulium atoms // *Phys. Rev. A. APS*, 2024. Т. 110, № 3. С. 32817.
 47. Giglberger D., Penselin S. Ground-state hyperfine structure and nuclear magnetic moment of thulium-169 // *Zeitschrift fuer Phys. Springer*, 1967. Т. 199, № 2. С. 244–255.
 48. Golovizin A. A., Kalganova E. S., Sukachev D. D., и др. Detection of the clock transition (1.14 μm) in ultra-cold thulium atoms // *Quantum Electron. IOP Publishing*, 2015. Т. 45, № 5. С. 482–485.
 49. Sukachev D., Sokolov A., Chebakov K., и др. Magneto-optical trap for thulium atoms // *Phys. Rev. A - At. Mol. Opt. Phys. American Physical Society*, 2010. Т. 82, № 1. С. 011405.
 50. Sukachev D., Sokolov A., Chebakov K., и др. Sub-doppler laser cooling of thulium atoms in a Magneto-optical trap // *JETP Lett.* 2010. Т. 92, № 10. С. 703–706.
 51. Сукачѐв Д. Лазерное охлаждение атомов тулия: дис. ... канд. физ.-мат. наук / Сукачѐв Д.Д. - ФИАИ, 2013.
 52. Vishnyakova G. A., Kalganova E. S., Sukachev D. D., и др. Two-stage laser cooling and optical trapping of thulium atoms // *Laser Phys. IOP Publishing*,

2014. Т. 24, № 7. С. 74018.
53. Sukachev D. D., Kalganova E. S., Sokolov A. V, и др. Secondary laser cooling and capturing of thulium atoms in traps // Quantum Electron. IOP Publishing, 2014. Т. 44, № 6. С. 515–520.
 54. Golovizin A., Tregubov D., Fedorova E., и др. Estimation of uncertainty budget for a thulium optical clock // AIP Conference Proceedings. 2020. Т. 2241. С. 020016.
 55. Golovizin A. A., Tregubov D. O., Fedorova E. S., и др. Simultaneous bicolor interrogation in thulium optical clock providing very low systematic frequency shifts // Nat. Commun. 2021. Т. 12, № 1. С. 5171.
 56. Fedorova E., Golovizin A., Tregubov D., и др. Simultaneous preparation of two initial clock states in a thulium optical clock // Phys. Rev. A. American Physical Society, 2020. Т. 102, № 6. С. 063114.
 57. Provorchenko D., Mishin D., Fedorova E., и др. Clock transition excitation efficiency determination using an additional short clock π -pulse // J. Phys. Conf. Ser. IOP Publishing, 2020. Т. 1692, № 1. С. 012003.
 58. Dick G. J. Local oscillator induced instabilities in trapped ion frequency standards // Proceedings of the 19th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. 1989. С. 133–147.
 59. Katori H. Longitudinal Ramsey spectroscopy of atoms for continuous operation of optical clocks // Appl. Phys. Express. IOP Publishing, 2021. Т. 14, № 7. С. 72006.