_ КОСМИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ. _____ РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ

УДК 530.1 DOI 10.30894/issn2409-0239.2019.6.1.24.31

На пути к мобильному оптическому стандарту частоты на нейтральных атомах иттербия

Г. С. Белотелов, belotelov@vniiftri.ru

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Российская Федерация

Д. В. Сутырин, sutyrin@vniiftri.ru

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Российская Федерация

С. H. Слюсарев, serslyu@mail.ru

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Российская Федерация

Аннотация. Достижение значений точности и нестабильности частоты оптических стандартов частоты уровня нескольких единиц 10^{-18} открывает новые возможности для применения этих систем в прикладной и фундаментальной физике. Для практической реализации таких возможностей необходимо создание мобильных оптических стандартов частоты. Во многих ведущих научно-исследовательских центрах мира ведутся разработки по созданию подобных установок. Цель нашей работы — улучшение таких характеристик оптического стандарта частоты, как компактность, масса, энергоэффективность при сохранении уровня относительной нестабильности и точности частоты, которые характерны для стационарных оптических стандартов частоты. В данной статье мы представляем обоснование создания мобильного оптического стандарта частоты на нейтральных атомах иттербия и первые результаты разработки узлов и компонентов для него. Разрабатываемое устройство может быть использовано как для создания карты гравитационных потенциалов Земли и для проведения тестов фундаментальной физики, так и для удаленной, в том числе межконтинентальной синхронизации частот оптических стандартов частоты. Результаты данной работы могут стать основой для создания бортовых прецизионных навигационных систем с использованием оптических стандартов частоты.

Ключевые слова: иттербий, холодные атомы, лазерное охлаждение, космос, гравиметрия

Towards a Transportable Optical Frequency Standard on Neutral Ytterbium Atoms

G.S. Belotelov, belotelov@vniiftri.ru

Federal State Unitary Enterprise "National Research Institute for Physicotechnical and Radio Engineering Measurements" (FSUE "VNIIFTRI"), Mendeleevo, Moscow region, Russian Federation

D.V. Sutyrin, sutyrin@vniiftri.ru

Federal State Unitary Enterprise "National Research Institute for Physicotechnical and Radio Engineering Measurements" (FSUE "VNIIFTRI"), Mendeleevo, Moscow region, Russian Federation

S.N. Slyusarev, serslyu@mail.ru

Federal State Unitary Enterprise "National Research Institute for Physicotechnical and Radio Engineering Measurements" (FSUE "VNIIFTRI"), Mendeleevo, Moscow region, Russian Federation

Abstract. The achievement of an accuracy and instability level of several units 10^{-18} for optical frequency standards opens up new possibilities for the application of these systems in engineering and fundamental physics. The practical realization of such possibilities requires the creation of transportable optical frequency standards. Many leading research centers in the world perform developments to create such installations. The aim of our work is to improve such characteristics of the optical frequency standard as compactness, mass, power efficiency while maintaining the levels of relative frequency stability and accuracy of laboratory optical frequency standards. In this article, we present a justification for the development of a transportable optical frequency standard based on cold ytterbium atoms and the first results of developments of modules and components for it. The device under development may be used for creating a map of Earth's gravitational potentials, and for conducting tests of fundamental physics, as well as for the remote, including intercontinental, frequency synchronization of optical frequency standards. The results of this work may serve as the basis for the creation of onboard precision navigation systems using optical frequency standards.

Keywords: ytterbium, cold atoms, laser cooling, space, gravimetry

Введение

Оптические стандарты частоты (ОСЧ) превзошли микроволновые стандарты частоты (СЧ) в значениях нестабильности и точности частоты [1-3], открыв такие новые возможности, как измерение гравитационного поля Земли и синхронизация с метрологической точностью разнесенных территориально стандартов частоты там, где нецелесообразно использовать волоконные линии связи. Реализация этих возможностей требует перехода от лабораторных ОСЧ к компактным и устойчивым в работе мобильным ОСЧ (МОСЧ) [4,5]. Однако сличение частот наземных ОСЧ может быть ограничено неопределенностью гравитационного потенциала в месте расположения ОСЧ и их ненулевой относительной скоростью из-за смещения поверхности земной коры, приливов и отливов океанов, эффектов влияния атмосферного давления на уровни океанов и т.п. [6]. Вдобавок к этому неконтролируемые флуктуации вносят другие долговременные явления: таяние льдов и дрифт тектонических плит. Будущие гипотетические ОСЧ, обладающие нестабильностью на уровне 10^{-18} , размещенные на разных тектонических плитах, будут чувствительны к эффекту Доплера, порождаемому относительным движением тектонических плит со скоростью на уровне 1-10 см/год [7]. Суммарное влияние всех возможных столь же малых эффектов может ограничить сличение удаленных друг от друга ОСЧ на уровне 10^{-17} [8].

Чтобы преодолеть это ограничение, можно разместить на спутнике, находящемся на геостационарной орбите, бортовой ОСЧ, что позволит улучшить точность сличения частот.

В этом случае достижение точности определения высоты орбиты в $40\,\mathrm{cm}$ будет необходимо для того, чтобы значение неопределенности гравитационного красного сдвига стандарта частоты, являющегося опорным, было бы на уровне 10^{-18} , что достигается посредством лазерной дальнометрии.

Для практической реализации подобных ОСЧ требуется пройти следующие этапы: создание и использование МОСЧ, переход к портативным ОСЧ и, наконец, создание ОСЧ, пригодных для бортового использования.

Использование мобильных **ОСЧ** для геодезических измерений

Создание мобильных ОСЧ позволит осуществлять измерения гравитационного потенциала Земли в разных локациях, что даст возможность создать более точную карту гравитационного поля. Эти измерения основаны на разном течении времени в точках с разными гравитационными потенциалами. Разница в гравитационном потенциале между ОСЧ, разнесенными между собой по высоте на 1 м приводит к возникновению относительной разницы частот на уровне $1 \cdot 10^{-16}$: $\frac{\Delta \nu}{\nu}$

$$= rac{-GM}{c^2} \left(rac{1}{r_1} - rac{1}{r_0}
ight)$$
, где r_0 и r_1 — высоты отно-

сительно геоида. В настоящее время стационарные ОСЧ достигли такого уровня относительной нестабильности и точности частоты, когда такая разница частот может быть измерена с точностью до $1 \cdot 10^{-18}$ [1,2].

С помощью этого же эффекта можно определять разность гравитационных потенциалов по измеренной разности частот разнесенных в пространстве ОСЧ. Чтобы измерить гравитационный потенциал, нужно иметь возможность разместить по крайней мере один мобильный ОСЧ в любом месте планеты и сличать его частоту с частотами стационарных ОСЧ. Данный метод известен как релятивистская геодезия.

Использование стандартов частоты в космосе

В данный момент точность навигации обеспечивается размещением на навигационных космических аппаратах пассивных водородных мазеров с величиной нестабильности частоты $1,9\cdot 10^{-15}$ за время наблюдения одни сутки [9]. Наземные водородные мазеры, цезиевые и рубидиевые фонтаны имеют предел относительной нестабильности частоты на уровне 10^{-16} . ОСЧ достигли значений точности и нестабильности частоты на уровне 10^{-18} , что может улучшить точностные характеристики навигационных систем на несколько порядков.

Создание ОСЧ космического базирования в перспективе обеспечит возможности для следующих научно-технических приложений [9]:

- сравнение шкал времени. Сличение и синхронизация наземных стандартов частоты для формирования международной шкалы времени;
- исследование Земли. Высокопрецизионное картографирование гравитационного поля Земли. Благодаря размещению ОСЧ в космосе станет возможным достижение такой высокой точности измерений гравитационного поля Земли, что, возможно, позволит обнаруживать на раннем этапе извержения вулканов и землетрясения;
- навигация. Высокоточные измерения профиля высот геоида станут источником для составления навигационных карт, т.е. обеспечат глобальность и значительно повысят помехозащищенность бортовых систем навигации. Более того, такие измерения позволят довести до совершенства метод определения характеристик гравитационного поля по релятивистскому сдвигу частоты, что сделает возможным создание карты гравитационных потенциалов Земли для навигации без использования спутниковых систем;
- фундаментальная физика. Тест общей теории относительности Эйнштейна [10].

Разработка мобильных и портативных ОСЧ в мире

Рекордные значения нестабильности и неопределенности частоты на уровне 10^{-18} были продемонстрированы для ОСЧ на оптических решетках на холодных атомах стронция и иттербия [1,2]. Однако эти устройства являются стационарными и необходимо создание мобильных систем с подобными характеристиками на их основе.

Существует несколько проектов, направленных на создание мобильных и портативных ОСЧ. По сведениям авторов, в мире созданы и испытаны три устройства. Первый из них — это ОСЧ на нейтральных атомах Sr, разработанный в рамках европейского проекта «Space Optical Clock (SOC)» [3, 11], целью которого является размещение ОСЧ на Международной космической станции. В создании ОСЧ принимали участие несколько известных

лабораторий Германии, Англии, Италии и такие ведущие производители лазерных систем, как Menlo Systems и Toptica (Германия). В рамках проекта SOC-2 был изготовлен ОСЧ на атомах иттербия группой под руководством профессора A. Görlitz. Ширина линии часового перехода МОСЧ на атомах иттербия составила 12 Гц [12,13]. Третий проект — МОСЧ на холодных атомах стронция, разработанный в РТВ (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Германия) в Брауншвейге. В этой установке ширина часового перехода составила 7 Гц, а относительная нестабильность частоты — $1.8 \cdot 10^{-16}$. Данная система использовалась в первом эксперименте по релятивистской геодезии с использованием МОСЧ в 2016 г. В этом эксперименте установка располагалась в горном туннеле Фрежус в итальянских Альпах на высоте 1 км относительно стационарного ОСЧ, расположенного в национальном итальянском метрологическом центре INRIM в Турине, с которым частота установки сличалась через волоконную линию. Результат эксперимента показал принципиальную возможность использования МОСЧ для проведения исследований по релятивистской геодезии. Однако он также показал необходимость повышения надежности узлов системы, в частности лазерных систем [4].

В Китае были созданы транспортируемые оптические часы на ионе Ca^+ объемом $0.5~{\rm M}^3$, демонстрирующие относительную нестабильность в 10^{-16} за время наблюдения одни сутки [14]. Кроме того, кооперацией немецких институтов и компаний (РТВ, Toptica, Menlo Systems) [15], а также независимо от нее во Франции [16] начата разработка транспортируемых часов на одиночном ионе Yb^+ . В России стартовал проект ИБИС по созданию бортового ОСЧ на одиночном ионе Yb^+ [17].

Кандидаты для создания мобильных и портативных **ОСЧ**

Для создания подобных установок сейчас используют атомы стронция, иттербия и других щелочно-земельных элементов. Также в качестве кандидатов рассматриваются стандарты на различных ионах (кальций, иттербий). В настоящий момент ОСЧ на ионах уступает ОСЧ на нейтральных

атомах на порядок по величине относительной нестабильности [18].

Устройство ОСЧ можно разделить на несколько модулей:

- вакуумный спектроскоп. Представляет собой единую вакуумную систему, собранную из отдельных сегментов источника горячих атомов, коллиматорной секции для сужения потока атомов, секции зеемановского замедления для предварительного охлаждения атомов, вакуумной камеры, гетероионных насосов, магнитных катушек в конфигурации анти-Гельмгольц для формирования магнитооптической ловушки (МОЛ);
- система лазерного охлаждения. Состоит из лазерной системы зеемановского замедлителя для начального охлаждения атомов, лазерных систем первичного и вторичного охлаждения для подготовки атомов к загрузке в оптическую решетку, лазерной системы формирования оптической решетки, лазерной системы опроса часового перехода, лазерной системы перекачки для увеличения количества плененных атомов.

В данной статье мы остановимся на сравнении между собой ОСЧ на фермионных изотопах нейтральных атомов (см. табл. 1), т.к. к настоящему моменту такие ОСЧ достигли лучших характеристик, чем ОСЧ на бозонных изотопах. Последние, однако, обладают потенциалом для улучшения своих характеристик [19].

Хотя нечетный изотоп стронция (87 Sr) имеет меньшие относительные сдвиги частоты по сравнению с иттербием (171 Yb), в пользу последнего как кандидата для МОСЧ говорит большая простота устройства.

Во-первых, у изотопа 171 Yb ядерный спин I=1/2 (87 Sr имеет ядерный спин I=9/2), что значительно снижает количество зеемановских подуровней. Это в конечном счете приводит к уменьшению количества необходимых лазерных систем для первичного охлаждения и перекачки. Уменьшение количества лазерных систем в установке приведет к улучшению таких параметров установки, как компактность, энергоэффективность и устойчивость работы.

Во-вторых, чувствительность иттербия к тепловому излучению приблизительно в два раза ниже, чем у стронция, при комнатной температуре.

Для
$$^{87} \mathrm{Sr}$$
: $\Delta \nu_{\mathrm{BBR}} = -2{,}354 \times \left(\frac{T(K)}{300}\right)^4$, для $^{171} \mathrm{Yb}$:
$$\Delta \nu_{\mathrm{BBR}} = -1{,}341 \times \left(\frac{T(K)}{300}\right)^4 \ [20].$$

В-третьих, в случае иттербия источник атомов обычно нагревается до 400 °C, что несколько ниже температур, используемых для нагрева источника атомов стронция, функционирующего обычно при температурах свыше 450 °C. Зависимость насыщенных паров от температуры для 87 Sr определяется выражением $\log P = 9,584 \pm 0,132 - \frac{7566 \pm 101}{T}$ [21], для 171 Yb $-\log P = 8,295 \pm 0,043 - \frac{7696 \pm 33}{T}$ [22].

Это снижает влияние излучения «черного» тела на часовой переход и требования к потреблению мощности и упрощает разработку конструкции установки (нет нужды в зеемановском замедлителе), что, в свою очередь, значительно сокращает общие размеры системы.

В-четвертых, ширина линии перехода $^1\mathrm{S}_0-^3\mathrm{P}_1$ у $^{171}\mathrm{Yb}$ составляет 182 кГц, что говорит о необязательности стабилизации лазерного излучения по дорогостоящему и чувствительному к вибрациям высокодобротному УЛЕ-резонатору, сделанному из стекла с низким коэффициентом теплового расширения (ULE $^{\mathrm{TM}}$, Corning ULE Laser Cavity Grade), необходимому в случае $^{87}\mathrm{Sr}$.

В-пятых, теоретически предсказано наличие дополнительных часовых переходов в атомах иттербия [23, 24]. Совместно с идеей синтетической частоты [25] это может привести к компенсации сдвига частоты ОСЧ, вызванного излучением «черного» тела, до уровня, который достигается в настоящее время в сложных стационарных системах с использованием криогеники.

Из вышесказанного следует, что при использовании атомов иттербия:

- уменьшается количество лазерных систем, необходимых для корректной работы установки, что является преимуществом при создании МОСЧ, т. к. уменьшает количество узлов, требующих фазовой или частотной привязки;
- уменьшаются общие габаритные размеры установки и мощность энергопотребления.

Поэтому в нашей работе сделан выбор в пользу ОСЧ на нейтральных атомах иттербия.

	⁸⁷ Sr	¹⁷¹ Yb	
Ядерный спин	9/2	1/2	
Чувствительность к тепловому излучению (при 300 K), Гц	-2,23	-1,25	
$^{1}{ m S}_{0}{}^{-1}{ m P}_{1}$ ширина линии, МГц	30	29	
$^{1}{ m S}_{0}{}^{-3}{ m P}_{1}$ ширина линии, к Γ ц	7,4	182	
Типичная температура источника атомов, °C	450	400	
Количество возможных часовых переходов	1 переход: 5s ^{2 1} S ₀ -5s5p ³ P ₀	2 перехода: $4f^{14}6s^2 {}^{1}S_0 - 4f^{14}6s6p {}^{3}P_0$ и $4f^{14}6s6p {}^{3}P_0 - 4f^{13}6s^25d (J = 2)$ [23]	

Tаблица 1. Сравнение $^{87} Sr$ и $^{171} Yb$

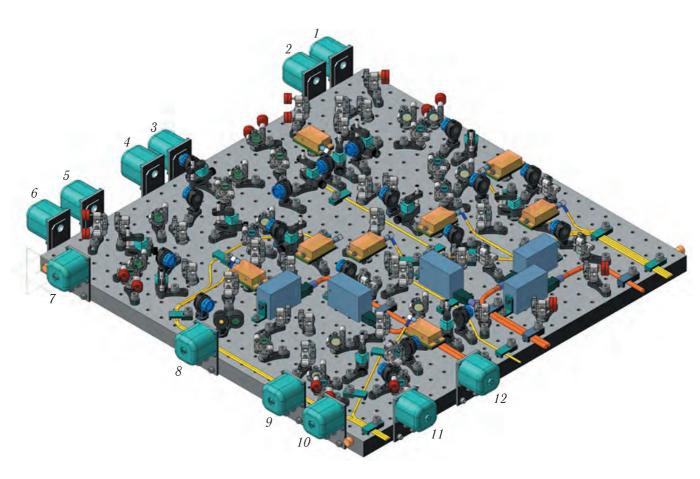


Рис. 1. Компактная распределительная система лазерного излучения для первичного и вторичного охлаждения атомов. На плите расположены оптические элементы, акустооптические модуляторы, затворы. Размер распределительной системы $60 \times 60 \times 12$ см. Оптоволоконные разъемы: 1- выходное излучение 556 нм для стабилизации частоты, 2- выходное излучение 399 нм для стабилизации частоты, 3- входное излучение 556 нм, 4- входное излучение 399 нм, 5, 6, 7- выходное излучение 556 нм +399 нм для 60 нм для однолучевой 60, 9, 10 выходное излучение 10 нм для 10 нм для детектирования облака плененных атомов, 10 выходное излучение 10 нм для зеемановского замедления

Разработки ФГУП «ВНИИФТРИ»

ОСЧ является сложной комплексной системой, важную роль в которой играют применяемые методы управления состояниями атомов. Для работы ОСЧ на первом этапе необходимо захватить достаточное количество атомов в МОЛ. Основными модулями такого СЧ являются: охлаждающие лазеры на 399 нм и 556 нм, вакуумная система (10^{-8} – 10^{-9} мбар), система формирования магнитных полей, оптомеханическая схема.

Для мобильной системы эти модули должны удовлетворять следующим требованиям:

- компактность;
- модульность;
- низкое энергопотребление;
- надежность (стабильность) работы.

Для удовлетворения этих требований в нашей лаборатории были проведены исследования по разработке отдельных компактных узлов. Работа выполнялась по следующим направлениям:

- предложена модульная структура системы МОСЧ на атомах иттербия;
- разработана компактная распределительная система лазерного излучения для первичного и вторичного охлаждения атомов (см. рис. 1);
- разработана компактная вакуумная камера (рис. 2).

Разработанные модули имеют ряд преимуществ по сравнению с имеющимися стационарными ОСЧ. Компактная распределительная система лазерного излучения включает всю необходимую оптику, затворы и акустооптические модуляторы, необходимые для проведения эксперимента. На разработанной схеме предусмотрены все необходимые отстройки частот для осуществления следующих этапов: коллимирующее излучение, зеемановское замедление, первичное охлаждение, вторичное охлаждение, детектирование и стабилизация лазерных систем. Дополнительно предусмотрено направление лазерного излучения для осуществления перехода от шестилучевой МОЛ к однолучевой МОЛ. Размеры существенно уменьшены по сравнению со стационарной установкой.

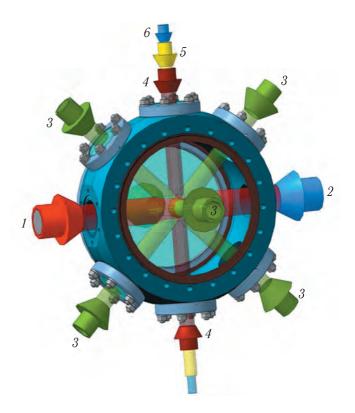


Рис. 2. Компактная вакуумная камера. Стрелками обозначены: 1- поток атомов иттербия, 2- лазерное излучение зеемановского замедлителя $\lambda=399$ нм, 3- лазерное излучение первичного и вторичного охлаждения атомов $\lambda=399+556$ нм, 4- лазерное излучение формирования оптической решетки $\lambda=759$ нм, 5- лазерное излучение часового лазера $\lambda=578$ нм, 6- лазерное излучение детектирования $\lambda=399$ нм

Размеры вакуумной камеры уменьшены приблизительно в 3 раза. Использование большого вакуумного фланца вместо стандартного позволяет с фронтального направления устанавливать камеру и фотоэлектронный умножитель для фиксирования облака плененных атомов.

Разработанные узлы должны существенно уменьшить размер МОСЧ по сравнению со стационарными ОСЧ, разработанными во Φ ГУП «ВНИИ Φ ТРИ» [26] (см. табл. 2).

Также были проведены экспериментальные работы по дальнейшему уменьшению вакуумной камеры оптического спектроскопа и уменьшению количества охлаждающих лучей с трех до одного с помощью конического или пирамидального отражателя [27], что важно для разработки портативного ОСЧ.

Характеристика	⁸⁷ Sr стационарный— существующая во ФГУП «ВНИИФТРИ» установка	МОСЧ на ¹⁷¹ Yb, прогноз	Коэффициент компактности
Кол-во лазерных систем, шт.	7	5	_
Площадь, м ²	20	8	20/8 = 2.5
Объем, м ³	40	20	40/20 = 2
Объем вакуумной камеры, л	35	11	$35/11 \sim 3$
Линейный размер источника атомов, см	32	12	32/12 = 2.6
Размер схемы оптического охлаждения, ${\rm cm} \times {\rm cm} \times {\rm cm}$	$300\times150\times20$	60 × 60 × 12 (см. рис. 1)	~20
Энергопотребление, кВт	15	8	~2

Таблица 2. Сравнение стационарных и мобильных установок

Заключение

Результаты разработки узлов позволяют сделать прогноз, что созданная мобильная установка будет примерно в 3 раза меньше, чем имеющаяся стационарная установка ОСЧ на ⁸⁷Sr. Созданные решения позволят разместить оптическую систему в объеме менее 20 м³. Такой размер достаточен для размещения ОСЧ в небольшом автомобильном прицепе. На следующий этап намечена экспериментальная реализация предложенных решений и планирование размещения модулей в фургоне, а также проработка термостабилизации, шумо- и виброизоляции установки в фургоне.

Список литературы

- 1. Bloom B.J. et al. An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level // Nature, 2014, vol. 506, Nole 7486. P. 71.
- 2. Beloy K. et al. Atomic clock with 1×10^{-18} room-temperature blackbody stark uncertainty // Physical review letters, 2014, vol. 113, \mathbb{N} 26. P. 260801.
- 3. Bongs K. et al. Development of a strontium optical lattice clock for the SOC mission on the ISS // Comptes Rendus Physique, 2015, vol. 16, № 5. P. 553–564.
- 4. *Grotti J. et al.* Geodesy and metrology with a transportable optical clock // Nature Physics, 2018. P. 1–9 + Supplement P. 10–12.

- 5. *Ludlow A.D.* An optical clock to go // Nature Physics, 2018, vol. 14, № 5. P. 431.
- 6. *Tapley B.D. et al.* GRACE measurements of mass variability in the Earth system // Science, 2004, vol. 305, № 5683. P. 503–505.
- 7. GNSS Time Series. http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series.html (Дата обращения 14.03.2019).
- 8. *Kleppner D*. Time too good to be true // Physics Today, 2006, vol. 59, № 3. P. 10.
- 9. *Gill P. et al.* Optical atomic clocks for space // National Physical Laboratory, 2008. P. 145.
- 10. *Tarallo M. G. et al.* Test of Einstein equivalence principle for 0-spin and half-integer-spin atoms: search for spin-gravity coupling effects // Physical review letters, 2014, vol. 113, № 2. P. 023005.
- 11. *Schiller S. et al.* The space optical clocks project // International Conference on Space Optics–ICSO 2010. International Society for Optics and Photonics, 2017, vol. 10565. P. 1056531.
- 12. Mura G. Optimierung und Charakterisierung einer transportablen optischen Gitteruhr mit Ytterbium (PhD thesis), Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2015.
- 13. *Mura G. et al.* The SOC2 171Yb optical lattice clock // The 8th Symposium on Frequency Standards and Metrology (poster talk), 2015.
- 14. Cao J. et al. A compact, transportable single-ion optical clock with 7.8×10^{-17} systematic uncertainty // Applied Physics B, 2017, vol. 123, $N_{\rm P}$ 4. P. 112.

- 15. Information on BMBF project opticlock. https://www.opticlock.de/en/info (Дата обращения 14.03.2019).
- 16. *Lacroûte C. et al.* Compact Yb+ optical atomic clock project: design principle and current status // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2016, vol. 723, № 1. P. 012025.
- 17. Zalivako I. et al. Towards compact transportable optical clock based on 171 Yb+ // European Frequency and Time Forum (EFTF), 2018. P. 344–347.
- 18. *Колачевский Н. Н. и др.* Перспективные квантово-оптические технологии для задач спутниковой навигации // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, № 1. С. 13–27.
- 19. Тайченачев А.В., Юдин В.И., Багаев С.Н. Сверхточные оптические стандарты частоты на ультрахолодных атомах: состояние и перспективы // Успехи физических наук, 2016, т. 186, № 2. С. 193–205.
- 20. Porsev S. G., Derevianko A. Multipolar theory of blackbody radiation shift of atomic energy levels and its implications for optical lattice clocks // Physical Review A, 2006, vol. 74, № 2. P. 020502.

- 21. *Asano M.*, *Kubo K*. Vapor pressure of strontium below 660 K // Journal of Nuclear Science and Technology, 1978, vol. 15, № 10. P. 765–767.
- 22. *Habermann C.E.*, *Daane A.H.* Vapor pressures of the rare-earth metals // The Journal of Chemical Physics, 1964, vol. 41, № 9. P. 2818–2827.
- 23. Safronova M. S. et al. Two clock transitions in neutral Yb for the highest sensitivity to variations of the fine-structure constant // Physical review letters, 2018, vol. 120, Ne 17. P. 173001.
- 24. *Dzuba V. A.*, *Flambaum V. V.*, *Schiller S.* Additional clock transitions in neutral ytterbium bring new possibilities for testing physics beyond the Standard Model // arXiv preprint arXiv:1803.02452, 2018.
- 25. *Yudin V.I. et al.* Atomic clocks with suppressed blackbody radiation shift // Physical review letters, 2011, vol. 107, № 3. P. 030801.
- 26. *Бердасов О. И. и др.* О продолжительности непрерывной работы оптического стандарта частоты на атомах стронция // Квантовая электроника, 2018, т. 48, № 5. С. 431–437.
- 27. Lee K.I. et al. Single-beam atom trap in a pyramidal and conical hollow mirror //Optics letters, 1996, vol. 21, № 15. P. 1177–1179.