

Государственный первичный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2-2021

Татьяна Павловна Акимова¹, Юрий Гордеевич Захаренко², Наталья Александровна Кононова³, Виктор Леонидович Федорин⁴, Зоя Викторовна Фомкина⁵✉, Константин Владимирович Чекирда⁶

1, 2, 3, 4, 5, 6 Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия, ¹T.P.Akimova@vniim.ru, ²Y.G.Zackharenko@vniim.ru, ³N.A.Kononova@vniim.ru, ⁴V.L.Fedorin@vniim.ru, ⁵Z.V.Fomkina@vniim.ru ✉, ⁶K.V.Chekirda@vniim.ru

Аннотация. Описаны основные этапы совершенствования Государственного первичного эталона единицы длины – метра. Описаны новые источники излучения и установки. Представлены результаты исследований метрологических характеристик источников эталонного излучения на длинах волн 633 и 532 нм. Исследования проведены с помощью He–Ne/I₂-лазера, стабилизированного по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде 127, установки для измерений разности частот источников лазерного излучения и комплекса аппаратуры для измерения частоты (длины волны в вакууме) лазеров в диапазоне длин волн 500–1050 нм на основе оптической частотной гребёнки. В результате исследований определены основные источники и границы составляющих неисключённой систематической погрешности и стандартной неопределённости по типу В, среднее квадратическое отклонение и стандартная неопределённость по типу А. Проведён сравнительный анализ метрологических характеристик ГЭТ 2-2010 и ГЭТ 2-2021, показывающий выполнение в ходе совершенствования эталона поставленных задач. Таким образом, стало возможным воспроизведение единицы длины на длине волны 633 нм со средним квадратическим отклонением $1,6 \cdot 10^{-12}$ и на длине волны 532 нм со средним квадратическим отклонением $1,3 \cdot 10^{-12}$, расширен диапазон передачи единицы длины источникам лазерного излучения и другим современным высокоточным средствам измерений. Полученные метрологические характеристики эталона не уступают лучшим мировым аналогам. Государственный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2-2021 успешно прошёл испытания и утверждён приказом Росстандарта.

Ключевые слова: государственный первичный эталон, воспроизведение единицы, передача единицы, стабилизированный лазер, оптическая частотная гребёнка, стандарт частоты и времени, интерференционный компаратор, сличения

Для цитирования: Акимова Т. П., Захаренко Ю. Г., Кононова Н. А., Федорин В. Л., Фомкина З. В., Чекирда К. В. Государственный первичный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2-2021 // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 3–7. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-3-7>

The State primary standard of the unit of length – metre GET 2-2021

Tatiana P. Akimova¹, Yuri G. Zackharenko², Natalia A. Kononova³, Victor L. Fedorin⁴, Zoya V. Fomkina⁵✉, Konstantin V. Chekirda⁶

1, 2, 3, 4, 5, 6 D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia, ¹T.P.Akimova@vniim.ru, ²Y.G.Zackharenko@vniim.ru, ³N.A.Kononova@vniim.ru, ⁴V.L.Fedorin@vniim.ru, ⁵Z.V.Fomkina@vniim.ru ✉, ⁶K.V.Chekirda@vniim.ru

Abstract. The main stages of modernization of the State primary standard of the unit of length are described. The structure of the standard, new laser sources and units are described. The results of research of metrological characteristics of lasers at wavelengths of 633 and 532 nm are presented. The research were carried out by the He–Ne/I₂ stabilized laser, the unit for measuring the frequency difference of laser radiation sources and the complex of equipment for measurement of laser frequency (wavelength in vacuum) in the wavelength range from 500 to 1050 nm (comb generator). As a result of the research, the main sources of the components of residual systematic error and standard uncertainty (type B), standard deviation and standard uncertainty (type A). The comparative analysis of the metrological characteristics of GET 2-2010 and GET 2-2021 are also given. Thus, it became possible to realize the unit of length at the wavelength of 633 nm with standard deviation of $1,6 \cdot 10^{-12}$ and at the wavelength of 532 nm with standard deviation of $1,3 \cdot 10^{-12}$, and the range of transferring of the unit of length to laser radiation sources and other modern high-precision measuring systems has been expanded. The State primary standard of the unit of length GET 2-2021 has been successfully tested and approved by the order of Rosstandart.

Keywords: the State primary standard of the unit of length – metre, realization of the unit, transferring of the unit, frequency stabilized laser, optical frequency comb, frequency and time standard, interference comparator, comparisons

Введение. В последние годы в отечественном инновационном производстве в таких областях промышленности,

как авиа- и ракетостроение, судостроение, прецизионное станкостроение и др. всё чаще применяются лазерные

интерференционные технологии измерений, а точность лазерных измерительных систем, заявленная производителем, сравнима с точностью рабочих эталонов. Таким образом, с целью обеспечения единства измерений в области геометрических измерений в Российской Федерации необходимо постоянно повышать точность воспроизведения единицы длины и её передачи источникам лазерного излучения и другим современным высокоточным средствам измерений.

В 2020 г. во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ) проведены работы по совершенствованию Государственного первичного эталона единицы длины – метра ГЭТ 2-2010 в рамках реализации Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 г. в области развития эталонной базы. Государственный первичный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2-2021 утверждён приказом Росстандарта № 63 от 02.02.2021 г.

Цель данной исследовательской работы – расширение функциональных возможностей, расширение диапазона передачи единицы длины и улучшение метрологических характеристик эталона, создание условий для участия Российской Федерации в международных ключевых сличениях для подтверждения калибровочных и измерительных возможностей, сохранения метрологического суверенитета Российской Федерации. Достижение лидерства Российской Федерации в международных метрологических организациях невозможно без разработки современных средств воспроизведения и передачи единицы длины.

Описание ГЭТ 2-2021. Исследование метрологических характеристик. В состав ГЭТ 2-2021 вошли следующие технические средства и вспомогательные устройства:

источник эталонного излучения – He–Ne/I₂-лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде 127;

источник эталонного излучения – Nd:YAG-лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде 127;

транспортируемый источник эталонного излучения – He–Ne/I₂-лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде 127;

комплекс аппаратуры для измерения частоты (длины волны в вакууме) лазеров в диапазоне длин волн 500–1050 нм;

стандарт частоты и времени водородный Ч1-1003М;

установка для измерений разности частот источников лазерного излучения;

компаратор универсальный интерференционный метровый;

компаратор лазерный интерференционный для измерения длины в субмикрометровом и нанодиапазоне;

интерферометр гетеродинный;

компаратор лазерный интерференционный тридцатиметровый.

В соответствии с Рекомендацией Международного комитета мер и весов [1] единица длины воспроизводится источниками эталонного излучения – частотно-стабилизированными лазерами на длинах волн 633 и 532 нм. Воспроизведение и передача единицы на длине волны 633 нм осуществляется с помощью двух He–Ne/I₂-лазеров, стабилизированных по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде 127. Один из источников разработан и создан во ВНИИМ и участвовал в ряде сличений [2]. Второй источник производства фирмы Winters Electro-Optics, Inc. (США) – транспортируемый, что позволяет передавать единицу длины стационарным источникам излучения [3].

Воспроизведение единицы на длине волны 532 нм производится с помощью Nd:YAG-лазера, стабилизированного по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде 127. Данный лазер разработан и изготовлен Институтом лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН) [4–8].

В ходе работ по исследованию эталона определены метрологические характеристики источников эталонного излучения. Среднее квадратическое отклонение (СКО) результатов измерений He–Ne/I₂-лазера и Nd:YAG-лазера получено с помощью комплекса аппаратуры для измерения частоты (длины волны в вакууме) лазеров в диапазоне длин волн 500–1050 нм (далее – комплекс). СКО результата измерений транспортируемого He–Ne/I₂-лазера определяли с помощью He–Ne/I₂-лазера и установки для измерений разности частот источников лазерного излучения (далее – установки) из состава эталона.

В ходе исследований выявлены основные источники и границы составляющих неопределённости

Таблица 2

СКО и стандартная неопределённость по типу А He–Ne/I₂-лазера и Nd:YAG-лазера

Источник погрешности / неопределённости	He–Ne/I ₂ -лазер	Nd:YAG-лазер
СКО ($n=100$)	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$1,3 \cdot 10^{-12}$
u_A	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$1,3 \cdot 10^{-12}$

Таблица 1

Источники и границы составляющих НСП и неопределённости по типу В He–Ne/I₂-лазера и Nd:YAG-лазера

Источник погрешности / неопределённости	He–Ne/I ₂ -лазер		Nd:YAG-лазер	
	НСП	u_B	НСП	u_B
Нестабильность частоты оптической частотной гребёнки	$3,0 \cdot 10^{-14}$	$1,8 \cdot 10^{-14}$	$2,6 \cdot 10^{-14}$	$1,5 \cdot 10^{-14}$
Метод измерений	$1,6 \cdot 10^{-13}$	$9,4 \cdot 10^{-14}$	$1,4 \cdot 10^{-13}$	$7,8 \cdot 10^{-14}$
Температура отростка ячейки	$6,3 \cdot 10^{-13}$	$3,7 \cdot 10^{-13}$	$5,1 \cdot 10^{-13}$	$3,0 \cdot 10^{-13}$
Ширина модуляции	$4,4 \cdot 10^{-13}$	$2,5 \cdot 10^{-13}$	$3,7 \cdot 10^{-13}$	$2,1 \cdot 10^{-13}$
Мощность излучения	$8,8 \cdot 10^{-14}$	$5,1 \cdot 10^{-14}$	$7,3 \cdot 10^{-14}$	$4,2 \cdot 10^{-14}$
Температуры стенки ячейки	$1,3 \cdot 10^{-13}$	$7,4 \cdot 10^{-14}$	$1,1 \cdot 10^{-13}$	$6,2 \cdot 10^{-14}$
Нестабильность частоты, вызванная работой системы автоматической подстройки частоты	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$6,3 \cdot 10^{-13}$	$9,2 \cdot 10^{-13}$	$5,3 \cdot 10^{-13}$

Таблица 3

Метрологические характеристики ГЭТ 2-2010 и ГЭТ 2-2021

Метрологические характеристики	ГЭТ 2-2010	ГЭТ 2-2021
Номинальные значения длин волн, при которых воспроизводится единица, нм	633	633 532
Диапазон передачи единицы длины, м	$1 \cdot 10^{-9}$ –30	$1 \cdot 10^{-9}$ –30
СКО воспроизведения единицы длины ($n=100$) на длине волны:		
633 нм	$5,6 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$
633* нм	–	$6,2 \cdot 10^{-12}$
532 нм	–	$1,3 \cdot 10^{-12}$
НСП воспроизведения единицы длины на длине волны:		
633 нм	$2,2 \cdot 10^{-12}$	$1,9 \cdot 10^{-12}$
633* нм	–	$1,0 \cdot 10^{-11}$
532 нм	–	$1,6 \cdot 10^{-12}$
u_A ($n=100$) на длине волны:		
633 нм	$5,6 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$
633* нм	–	$6,2 \cdot 10^{-12}$
532 нм	–	$1,3 \cdot 10^{-12}$
u_B на длине волны:		
633 нм	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$7,8 \cdot 10^{-13}$
633* нм	–	$4,2 \cdot 10^{-12}$
532 нм	–	$6,5 \cdot 10^{-13}$
Суммарная стандартная неопределённость на длине волны:		
633 нм	$5,8 \cdot 10^{-12}$	$1,8 \cdot 10^{-12}$
633* нм	–	$7,5 \cdot 10^{-12}$
532 нм	–	$1,5 \cdot 10^{-12}$
Расширенная неопределённость на длине волны:		
633 нм	$1,16 \cdot 10^{-11}$	$3,6 \cdot 10^{-12}$
633* нм	–	$1,5 \cdot 10^{-11}$
532 нм	–	$3,0 \cdot 10^{-12}$
Диапазон передачи единицы длины источникам лазерного излучения, нм	–	500–1050
СКО передачи единицы длины с помощью интерферометра гетеродинного и компаратора лазерного интерференционного для измерений длины в субмикрометровом и нанодиапазоне ($n=10$) ($1 \cdot 10^{-9}$ – $1 \cdot 10^{-4}$) м, нм	0,1	0,1
СКО передачи единицы длины с помощью компаратора универсального интерференционного метрового ($n=10$) ($1 \cdot 10^{-6}$ –1) м, мкм	0,03	0,03
СКО передачи единицы длины с помощью компаратора лазерного интерференционного тридцатиметрового ($n=10$) ($5 \cdot 10^{-9}$ –30) м, мкм	5	5

Примечание. *Транспортируемый лазер.

систематической погрешности (НСП) и стандартной неопределённости по типу В u_B , а также СКО и стандартная неопределённость по типу А u_A для каждого из источников эталонного излучения. Результаты исследований He-Ne/I₂-лазера и Nd:YAG-лазера представлены в табл. 1, 2.

Передача единицы длины от ГЭТ 2-2021 источникам лазерного излучения осуществляется с помощью установки и комплекса.

При использовании для передачи единицы длины установки частота излучения исследуемого лазера определяется методом оптического гетеродинамирования. Сигнал с фотоприёмника поступает на усилитель сигнала, а затем на частотомер и анализатор спектра. Данные с анализатора спектра и частотомера поступают на персональный компьютер. В состав ГЭТ 2-2021 введены оптомеханические и электронные компоненты, а также разработано программное обеспечение «Лазер-Лазер», позволившее автоматизировать процесс измерений и уменьшить время их проведения [9].

С целью расширения диапазона передачи единицы длины лазерным источникам излучения в состав ГЭТ 2-2021 включён комплекс, который реализует передовую измерительную технологию на основе оптической частотной гребёнки (КОМБ-генератор) фирмы «Menlo Systems GmbH», Германия [10–14]. Для формирования высокостабильного спектрально чистого опорного сигнала частотой 5 МГц для оптической частотной гребёнки применяется водородный стандарт частоты и времени Ч1-1003М производства ЗАО «Время-Ч», Россия, что обеспечивает связь ГЭТ 2-2021 с Государственным первичным эталоном единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018.

Стабильность частоты оптической гребёнки определяется стабильностью выходного сигнала водородного стандарта частоты, характеризуемого средним квадратическим относительным двухвыборочным отклонением частоты при полосе пропускания 3 Гц, и составляет $0,5 \cdot 10^{-15}$ в сутки. Результаты измерений обрабатываются с помощью специализированного программного обеспечения «СОМВ-Лазер» [9].

В ходе работ по совершенствованию были проведены исследования метрологических характеристик компараторов для передачи единицы длины материальным мерам длины и применяемым в качестве рабочих эталонов приборам и подтверждена их стабильность за последние десять лет.

Сравнение метрологических характеристик ГЭТ 2-2010 и ГЭТ 2-2021. Сравнение характеристик ГЭТ 2-2010 [15] и

ГЭТ 2-2021 приведено в табл. 3. Метрологические характеристики ГЭТ 2-2021 улучшены и соответствуют современным требованиям, предъявляемым наукой и различными отраслями промышленности.

Международные сличения. ВНИИМ постоянно участвует в международных сличениях в области измерений геометрических величин, таких как сличения первичных эталонов единицы длины по теме BIPM.L-K11, сличения установок для

измерений концевых мер длины по темам CCL-K1, CCL-K2, сличения установок для измерений штриховых мер длины по теме EUROMET.L-K7 и др.

Выводы. Проведённые работы позволили расширить функциональные возможности эталона и улучшить его метрологические характеристики. Воспроизведение единицы длины на длине волны 633 нм стало возможным с СКО $1,6 \cdot 10^{-12}$, на длине волны 532 нм – с СКО $1,3 \cdot 10^{-12}$. Включение в состав эталона транспортируемого источника эталонного лазерного излучения с длиной волны 633 нм позволяет передавать единицу длины стационарным высокоточным лазерным системам с СКО $6,2 \cdot 10^{-12}$. С помощью комплекса на основе оптической частотной гребёнки осуществляется передача единицы длины в диапазоне от 500 до 1050 нм. Реализация данных задач позволяет сохранить метрологический суверенитет РФ и обеспечить соответствие метрологических характеристик лучшим мировым аналогам.

Перспективы дальнейшего совершенствования ГЭТ 2-2021 связаны с развитием технологий создания оптических частотных гребёнок и высокоточных лазерных систем на различных длинах волн.

Список источников

1. Recommended values of standard frequencies for the metre. URL: <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies-metre> (дата обращения: 15.10.2021).
2. Александров В. С., Захаренко Ю. Г., Кононова Н. А., Лейбенгард Г. И., Федорин В. Л., Чекирда К. В. Государственный первичный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2-2010 // Измерительная техника. 2012. № 6. С. 3–7.
3. Kononova N. A., Zakharenko Yu. G., Fedorin V. L., Fomkina Z. V., *Investigations of metrological characteristics of the "Winters Electro-Optics, Inc." iodine-stabilized He-Ne laser by The State Primary Standard of the Unit of Length – GET 2-2010, 18th International Conference on Laser Optics ICLO 2018*, St. Petersburg, p. 56.
4. Денисов В. И., Игнатович С. М., Квашнин Н. Л., Скворцов М. Н., Фарносов С. А. Прецизионная модуляция лазерного излучения акустооптическим модулятором для стабилизации Nd:YAG-лазера по оптическим резонансам в молекулярном йоде // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 5. С. 464–467.
5. Скворцов М. Н., Охалкин М. В., Невский А. Ю., Багаев С. Н. Оптический стандарт частоты на основе Nd:YAG-лазера, стабилизированного по резонансам насыщенного поглощения в молекулярном йоде с использованием второй гармоники излучения // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 12. С. 1101–1106.
6. Peter Jungner, Mark L. Eickhoff, Steve D. Swartz, Jun Ye, John L. Hall, Steeve B. Waltman, *Proc. SPIE 2378, Laser Frequency Stabilization and Noise Reduction*, 1995, vol. 2378, pp. 22–34. <https://doi.org/10.1117/12.208229>
7. Holzwarth R., Nevsky A. Yu., Zimmermann M., Udem Th., Hansch T. W., Von Zanthier J., Walther H., Knight J. C., Wadsworth W. J., Russell P. St. J., Skvortsov M. N., Bagayev S. N.,

Absolute frequency measurement of iodine lines with a femtosecond optical synthesizer, *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2001, vol. 73(3), pp. 269–271.

8. Игнатович С. М., Квашнин Н. Л., Скворцов М. Н. Сдвиг частоты иодного оптического стандарта частоты в зависимости от величины пробной модуляции частоты излучения, давления и температуры газа в поглощающей ячейке // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 10. С. 973–976.

9. Захаренко Ю. Г., Кононова Н. А., Фомкина З. В., Чекирда К. В., Лукин А. Я. Разработка прикладного программного обеспечения для комплекса аппаратных средств высшей точности для воспроизведения и передачи единицы длины // Приборы. 2018. № 12(222). С. 42–47.

10. Холл Дж. Л. Определение и измерение оптических частот: перспективы оптических часов и не только // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 12. С. 1353–1367. <https://doi.org/10.3367/UfNr.0176.200612i.1353>

11. Хэнш Т. В. Страсть к точности // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 12. С. 1368–1380. <https://doi.org/10.3367/UfNr.0176.200612j.1368>

12. Tsaturian V., *Femtosecond combs for optical frequency metrology*, 2013, available at: https://www.ros.hw.ac.uk/bitstream/handle/10399/2747/TsaturianV_0314_eps.pdf?sequence=1 (accessed: 15.03.2021).

13. Sizmann A., Fischer M., Holzwarth R. Calibration System based on a Laser Frequency Comb. Interim Report to ESO Version 0.1. Menlo Systems GmbH. 2006. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.eso.org/~lpasquin/permarco/Interim Report Calibration System V0.1 20.6.06.pdf](http://www.eso.org/~lpasquin/permarco/Interim%20Report%20Calibration%20System%20V0.1%2020.06.pdf) (дата обращения: 15.03.2021).

14. Ye J., Schnatz H., Hollberg L. W., *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, vol. 9. no. 4, pp. 1041–1058. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2003.819109>

15. Захаренко Ю. Г., Кононова Н. А., Федорин В. Л., Фомкина З. В., Чекирда К. В. Перспективы развития эталонной базы Российской Федерации в области измерений длины // Измерительная техника. 2020. № 2. С. 3–5. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-2-3-5>

References

1. Recommended values of standard frequencies for the metre, available at: <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies-metre> (accessed: 15.10.2021).
2. Alexandrov V. S., Zakharenko Yu. G., Kononova N. A., Leibengardt G. I., Fedorin V. L., Chekirda K. V., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 55, no. 6, pp. 595–602. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-0007-y>
3. Kononova N. A., Zakharenko Yu. G., Fedorin V. L., Fomkina Z. V., *Investigations of metrological characteristics of the "Winters Electro-Optics, Inc." iodine-stabilized He-Ne laser by The State Primary Standard of the Unit of Length – GET 2-2010, 18th International Conference on Laser Optics ICLO 2018*, St. Petersburg, p. 56.
4. Denisov V. I., Ignatovich S. M., Kvashnin N., Skvortsov M. N., *Quantum Electronics*, 2016, vol. 46, no. 5, pp. 464–467. <http://dx.doi.org/10.1070/QEL16015>

5. Skvortsov M. N., Okhapkin M. N., Nevskii A. Yu., Bagayev S. N., *Quantum Electronics*, 2004, vol. 34(12), pp. 1101–1106. <http://dx.doi.org/10.1070/QE2004v034n12ABEH002851>
6. Peter Jungner, Mark L. Eickhoff, Steve D. Swartz, Jun Ye, John L. Hall, Steave B. Waltman, *Proc. SPIE 2378, Laser Frequency Stabilization and Noise Reduction*, 1995, vol. 2378, pp. 22–34. <https://doi.org/10.1117/12.208229>
7. Holzwarth R., Nevsky A. Yu., Zimmermann M., Udem Th., Hansch T. W., Von Zanthier J., Walther H., Knight J. C., Wadsworth W. J., Russell P. St. J., Skvortsov M. N., Bagayev S. N., Absolute frequency measurement of iodine lines with a femtosecond optical synthesizer, *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2001, vol. 73(3), pp. 269–271.
8. Ignatovich S. M., Kvashnin N., Skvortsov M. N., *Quantum Electronics*, 2018, vol. 48(10), pp. 973–976. <http://dx.doi.org/10.1070/QEL16609>
9. Zakharenko Yu. G., Kononova N. A., Fomkina Z. V., Chekirda K. V., Lukin A. Ya., Development of application program for a complex of high-precision hardware instruments for reproduction and transmission of the unit of length, *Instruments*, 2018, no. 12(222), pp. 42–47. (In Russ.)
10. Hall J. L., Definition and measurement of optical frequencies: perspectives of optical clocks – and not only, *Phys. Usp.*, 2006, vol. 176, no. 12, pp. 1353–1367. (In Russ.) <https://doi.org/10.3367/UFNr.0176.200612i.1353>
11. Hensh T. V., Passion for accuracy, *Phys. Usp.*, 2006, vol. 176, no. 12, pp. 1368–1380. (In Russ.) <https://doi.org/10.3367/UFNr.0176.200612j.1368>
12. Tsaturian V., *Femtosecond combs for optical frequency metrology*, 2013, available at: https://www.ros.hw.ac.uk/bitstream/handle/10399/2747/TsaturianV_0314_eps.pdf?sequence=1 (accessed: 15.03.2021).
13. Sizmann A., Fischer M., Holzwarth R., *Calibration System based on a Laser Frequency Comb. Interim Report to ESO, Version 0.1, Menlo Systems GmbH*, 2006, available at: http://www.eso.org/~lpasquin/permarco/Interim_Report_Calibration_System_V0.1_20.6.06.pdf (accessed: 15.03.2021).
14. Ye J., Schnatz H., Hollberg L. W., *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, vol. 9, no. 4, pp. 1041–1058. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2003.819109>
15. Zakharenko Yu. G., Kononova N. A., Fedorin V. L., Fomkina Z. V., Chekirda K. V., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 2, pp. 77–80. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01753-9>

Статья поступила в редакцию 24.05.2021; одобрена после рецензирования 09.06.2021; принята к публикации 09.06.2021.
 The article was submitted 24.05.2021; approved after reviewing 09.06.2021; accepted for publication 09.06.2021.