

**О ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ  
ПАРАМЕТРОВ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ  
С ПОМОЩЬЮ КВАНТОВО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**В.Ф. Фатеев, И.Ю. Игнатенко**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,  
fateev@vniiftri.ru*

*Аннотация. В работе рассмотрена допустимость использования высоких метрологических возможностей квантово-оптических систем (КОС) и атомных часов для дистанционного измерения разности гравитационных потенциалов и высот точек на поверхности Земли. Предлагается оригинальный эксперимент между Москвой и Иркутском, вблизи которых имеются КОС нового поколения. В качестве мобильных атомных часов предлагается использование отечественных перебазированных водородных атомных часов. Ожидаемая погрешность эксперимента — около метра.*

*Ключевые слова: гравитационные потенциалы, атомные часы, геоид, физическая поверхность Земли, сличение частот, квантово-оптическая система, шкала времени.*

**ON THE POSSIBILITY OF MEASURING THE PARAMETERS  
OF THE EARTH'S GRAVITATIONAL FIELD USING  
QUANTUM-OPTICAL SYSTEMS**

**V.F. Fateev, I.Yu. Ignatenko**

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,  
fateev@vniiftri.ru*

*Abstract. The paper considers the possibility of using the high metrological capabilities of quantum optical systems (QOS) and atomic clocks for remote measurement of gravitational potential differences and heights of points on the Earth's surface. An original experiment is proposed between Moscow and Irkutsk, near which a new generation of QOS are available. The use of domestic relocatable hydrogen atomic clocks is proposed as mobile atomic clocks. The expected error of the experiment is about a meter.*

*Keywords: gravitational potentials, atomic clock, geoid, physical surface of the Earth, frequency comparison, quantum optical system, time scale.*

**Введение**

В 2015 г. на Пражской конференции IAG была принята специальная резолюция «Об определении и реализации Международной системы отсчёта высот (IHRS)» [1]. Согласно этой резолюции, за опорную поверхность при определении высоты следует принять эквипотенциальную поверхность геоида, и высоту любой точки на Земле отсчитывать относительно неё. Эти

высоты предлагается определять через эквивалентную разность гравитационных потенциалов  $\Delta C_G = \varphi_0 - \varphi_m$ , которая называется геопотенциальным числом. Здесь  $\varphi_0 = 6,26368534 \cdot 10^7 \text{ м}^2/\text{с}^2$  — гравитационный потенциал на поверхности геоида, который является величиной постоянной для любой широты и долготы;  $\varphi_m$  — потенциал в исследуемой точке, значение которого определяется пространственными координатами точки в Международной земной системе координат ITRF.

На основе этой резолюции с 2017 г. в Международной ассоциации геодезии IAG создан сервис IHRF, главной задачей которого является установление единой высокоточной глобальной системы высот. Создана рабочая группа по стратегии реализации IHRF.

В новой системе определения высот измеряемой физической величиной является разность гравитационных потенциалов. Согласно общей теории относительности, физическими эффектами, непосредственно связанными с разностью гравитационных потенциалов, являются эффекты гравитационного смещения частоты и гравитационного замедления (смещения) времени. Эти эффекты в настоящее время измеряются с помощью высокостабильных стандартов частоты и времени (СЧВ). В свою очередь, геопотенциальное число в первом приближении линейно связано с разностью ортометрических высот геоида и исследуемой точки через значение ускорения свободного падения.

Для неподвижных наземных атомных часов, первые из которых размещены на поверхности геоида, а вторые — на физической поверхности Земли, формула для этих эффектов представляется в следующем приближённом виде [3–5]:

$$\frac{\Delta\tau_{GR}}{\tau_H} = \frac{\Delta f_{GR}}{f} = \frac{\Delta C_m}{c^2} \approx \frac{g_m \cdot \Delta H_{ORT}}{c^2}, \quad (1)$$

где  $\Delta\tau_{GR}$  — эффект гравитационного расхождения шкал времени СЧВ на интервале времени  $\tau_H$  (эффект гравитационного замедления времени Эйнштейна [2]);  $\frac{\Delta f_{GR}}{f}$  — соответствующее гравитационное смещение частоты задающего

генератора высокостабильного СЧВ;  $\Delta C_m = \varphi_0 - \varphi_m$  — геопотенциальное число;  $g_m$  — абсолютное значение УСП в точке измерения геопотенциального числа;  $c$  — скорость света;  $\Delta H_{ORT}$  — ортометрическая высота часов над поверхностью геоида.

В Международной глобальной геодезической системе GGOS установлено требование измерения геопотенциального числа с погрешностью на уровне  $10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}^2$ . Как следует из предыдущей формулы, для достижения такой точности необходимы СЧВ с относительной нестабильностью  $10^{-19}$ , а погрешность измерения разности ортометрических высот точек на поверхности Земли составляет 1 мм.

Комплекс средств, необходимых для измерения геопотенциального числа и соответствующей разности ортометрических высот, включает два разнесённых СЧВ и систему измерения расхождения их шкал времени или разности частот их задающих генераторов. В основе этих измерительных систем лежат системы синхронизации или сличения частот. Такой комплекс можно назвать *квантовым нивелиром* [5]. По сравнению с классическим нивелиром его погрешность слабо зависит от расстояния между исследуемыми точками и он, в зависимости от возможностей системы синхронизации, может выполнять глобальные измерения. Синхронизация может выполняться с использованием сигналов ГНСС, РСДБ, а также с помощью ВОЛС.

В РФ имеется опыт проведения экспериментов на макетах квантового нивелира, использующих эффекты замедления времени в ГПЗ [6, 7]. Они выполнялись на основе перебазируемых квантовых водородных часов с нестабильностью  $1 \cdot 10^{-15}$  и  $4 \cdot 10^{-15}$  с синхронизацией по ГНСС. При этом погрешность измерений гравитационного эффекта составила 0,2–0,3 нс. Эксперименты подтвердили работоспособность макетов, однако в силу плохой точности синхронизации в них не удалось получить высокую точность определения ортометрических высот. С целью повышения точности квантового нивелира на основе сравнения временных шкал двух разнесённых СЧВ в РФ предложен и испытан метод релятивистской синхронизации СЧВ [8], основанный на компенсации релятивистских смещений шкалы времени на трассе движения мобильного СЧВ по измерениям его текущих координат и скорости с помощью бортовой НАП ГНСС. При длине трассы 300–500 км ожидаемая погрешность метода, определяемая возможностями современной НАП в дифференциальном режиме, составляет десятки пикосекунд. Вместе с тем этот метод основан на использовании замкнутого маршрута перемещения мобильного СЧВ, что при больших расстояниях требует больших затрат времени.

### **Особенности применения КОС**

Более высокую точность и оперативность измерения разности гравитационных потенциалов в двух пространственно-разнесённых точках способны обеспечить современные квантово-оптические системы (КОС), использующие лазерные линии «Земля — космос» с глубокой компенсацией трудно прогнозируемых атмосферных задержек.

Известны зарубежные состоявшиеся и планируемые эксперименты на основе таких КОС по определению расхождения шкал времени наземных и бортовых космических высокостабильных хранителей времени. В эксперименте LASSO в 1992 г. состоялась первая оптическая передача шкалы времени между обсерваториями OCA во Франции и McDonald (штат Техас, США). Достигнутые значения погрешности передачи шкалы времени составили около 0,1 нс [11]. Уже первые эксперименты по проекту T2L2 улучшили результат примерно на порядок [12]. В планируемом ЕКА эксперименте ACES

на основе высокостабильного СЧВ PHARAO [13] ожидаемая погрешность измерения рассогласования наземной и спутниковых шкал времени составляет 100 пс. В экспериментах, проведённых в России [14, 15], была достигнута погрешность не более 180 пс при десятиминутных сеансах. Надо отметить, что работы проводились на станциях предыдущего поколения и ввод новых станций типа «Точка» позволит уменьшить эту погрешность не менее чем вдвое.

Принцип измерения рассогласования шкал с помощью таких КОС основан на измерении времени распространения стартового лазерного импульса от наземного излучателя (назовём его КОС-А) до космического аппарата КА, отражении его с помощью бортового углового отражателя (УО) в обратном направлении и приёме отражённого импульса на наземном фотоприёмнике КОС-А. Кроме того, прямой сигнал принимается на борту КА с помощью специального фотоприёмника. Условимся, что стартовый импульс КОС-А привязан к определённой секундной метке шкалы времени  $\tau_A$  наземного хранителя времени (атомных часов)  $A$ . Тогда измеряемое на Земле время распространения этого импульса «туда и обратно» по этой шкале составляет:

$$\Delta\tau_{\uparrow\downarrow A}^H = \frac{2}{c} \int_R \vec{n}(\vec{R}) d\vec{R}, \quad (2)$$

где  $\vec{n}(\vec{R})$  — коэффициент преломления тропосферы вдоль оптического луча, который изменяется вдоль пути  $\vec{R}$ ; значок  $\uparrow\downarrow$  обозначает прямой и отражённый лучи.

Одновременно лазерный импульс принимается с помощью бортового фотоприёмника и на спутнике измеряется время его прихода относительно одноименной секундной метки, формируемой спутниковой шкалой времени  $\tau_{КА}$ :

$$\Delta\tau_{\uparrow A}^H = \frac{1}{c} \int_R \vec{n}(\vec{R}) d\vec{R} - \delta\tau_A = \frac{1}{c} \int_R \vec{n}(\vec{R}) d\vec{R} - (\tau_{КА} - \tau_A), \quad (3)$$

где обозначено  $\delta\tau_A = \tau_{КА} - \tau_A$  — расхождение шкалы времени спутника  $\tau_{КА}$  и наземного хранителя времени  $A$ ; значок  $\uparrow$  соответствует прямому лазерному лучу, принимаемому на борту КА.

Из полученных формул следует выражение для искомого расхождения наземной и бортовой шкал времени:

$$\delta\tau_A^{КА} = \tau_A - \tau_{КА} = \Delta\tau_{\uparrow A}^H - \frac{1}{2} \Delta\tau_{\uparrow\downarrow A}^H. \quad (4)$$

Если по этому же спутнику с небольшим разном по времени (не более единиц минут) такие же операции выполняются с помощью другой лазерной станции КОС-В, импульсы которой привязаны к шкале атомных часов  $\tau_B$ , то для неё аналогично получаем:

$$\delta\tau_B^{КА} = \tau_B - \tau_{КА} = \Delta\tau_{\uparrow B}^H - \frac{1}{2} \Delta\tau_{\uparrow\downarrow B}^H. \quad (5)$$

По результатам измерений на сигналах двух КОС из последних формул находим расхождение шкал двух пространственно-разнесённых наземных атомных хранителей времени:

$$\tau_B - \tau_A = (\delta\tau_B^{\text{КА}} - \delta\tau_A^{\text{КА}}) = \left( \Delta\tau_{\uparrow B}^{\text{II}} - \frac{1}{2} \Delta\tau_{\uparrow\downarrow B}^{\text{II}} \right) - \left( \Delta\tau_{\uparrow A}^{\text{II}} - \frac{1}{2} \Delta\tau_{\uparrow\downarrow A}^{\text{II}} \right). \quad (6)$$

В этих формулах для упрощения не учтены дополнительные задержки лазерного импульса, вызванные неполной компенсацией влияния атмосферы, релятивистскими эффектами распространения, пространственным смещением УО и фотодетектора на борту КА и др. Эти эффекты рассмотрены в ряде работ, например [11]. Вместе с тем эти эффекты весьма незначительны и пренебрежение ими не повлияет на главные выводы данной работы.

Эксперименты LASSO, T2L2, а также отечественные работы, выполненные в рамках программы ГЛОНАСС, показали высокие потенциальные возможности КОС при определении расхождения шкал наземных и спутниковых атомных часов: достижимый уровень погрешности точности определения величин, определяемых формулами (4) и (5), характеризуется погрешностью в десятки пикосекунд.

### Измерение параметров ГПЗ с помощью КОС

Для измерения геопотенциального числа и соответствующей разности ортометрических высот двух пространственно-разнесённых точек необходимо иметь две лазерные измерительные системы: КОС-А, стартовые импульсы которой привязаны к шкале времени  $\tau_A$  стационарных атомных часов АЧ-А, и КОС-В, импульсы которой привязаны к шкале времени мобильных часов АЧ-В  $\tau_B$ . Эти часы (например, водородные) перемещаются после начальной калибровки от точки размещения стационарных часов (точка «А») в точку «Б», в которой размещена КОС-В.

Разность показаний шкал времени двух наземных атомных часов, неподвижно размещённых в точках «А» и «Б», изменяется по закону [4]:

$$\tau_B - \tau_A = (\tau_B - \tau_A)_0 + \left( K_1 + \frac{\Delta f_{GR}}{f_A} \right) \Delta\tau_A + K_2 \Delta\tau_A^2, \quad (7)$$

где  $\Delta\tau_A = \tau_A - \tau_A^0$  — интервал времени, отсчитываемый по шкале  $\tau_A$  относительно начального момента синхронизации  $\tau_A^0$ ;  $\Delta f K_1 = \frac{f_B - f_A}{f_A} = \frac{\Delta f}{f_A}$  — коэффициент, характеризующий относительное начальное расхождение частот задающих генераторов атомных часов;  $K_2 = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \tau_A} \left( \frac{\Delta f}{f_A} \right)$  — коэффициент, характеризующий относительную нестабильность частоты генератора АЧ-В

относительно частоты эталонного генератора АЧ-А;  $\frac{\Delta f_{GR}}{f} = \frac{\Delta C_{AB}}{c^2} \approx \frac{g_B \cdot \Delta H_{ORT}}{c^2}$  —

относительное гравитационное смещение частоты задающих генераторов двух атомных часов, которое приближённо определяется формулой (1).

Процесс измерений геопотенциального числа  $\Delta C_{AB}$  между этими точками и ортометрической высоты точки «В» над точкой «А»  $\Delta H_{ORT}$  складывается из следующих последовательных действий.

*Действие 1.* Начальная калибровка атомных часов АЧ-А и АЧ-В в точке размещения стационарных часов. В процессе начальной калибровки определяют расстройку частоты задающего генератора АЧ-В относительно частоты базового генератора АЧ-А  $\Delta f/f_A$  и соответствующие коэффициенты  $K_1, K_2$ .

*Действие 2.* Перемещение мобильных атомных часов АЧ-В из точки «А» в точку «В» и привязка КОС-В к шкале времени  $\tau_B$ .

*Действие 3.* Измерение в начальный момент времени  $\tau_A = \tau_A^0$  (т.е. на момент синхронизации) с помощью КОС-А и КОС-В расхождений шкал времени атомных часов АЧ-А и АЧ-В и бортовой шкалы КА  $\delta\tau_A^{KA}, \delta\tau_B^{KA}$ , которые определяются формулами (4) и (5). Измерения производятся разными КОС практически одновременно по одному и тому же КА с разносом измерений не более нескольких минут, необходимых для набора статистически значимого ряда данных.

*Действие 4.* По результатам измерений  $\delta\tau_A^{KA}, \delta\tau_B^{KA}$  на момент синхронизации определяется расхождение шкал двух наземных атомных часов. При  $\Delta\tau_A^0 = \tau_A - \tau_A^0 = 0$  из формулы (7) имеем:

$$(\tau_B - \tau_A)_{\Delta\tau=0} = (\tau_B - \tau_A)_0 + \sigma_\tau. \quad (8)$$

*Действие 5.* Повторное измерение с помощью КОС расхождений обоих наземных атомных часов относительно спутниковых часов на момент накопления гравитационного эффекта  $\Delta\tau_A = \tau_H$  и вычисление расхождений наземных часов по формуле (7):

$$\begin{aligned} (\tau_B - \tau_A)_H &= (\tau_B - \tau_A)_0 + (K_1\tau_H + K_2\tau_H^2) + \tau_H \frac{\Delta C_{AB}}{c^2} \approx \\ &\approx (\tau_B - \tau_A)_0 + (K_1\tau_H + K_2\tau_H^2) + \tau_H \frac{g_B \cdot \Delta H_{ORT}}{c^2} + \sigma_\tau. \end{aligned} \quad (9)$$

*Действие 6.* Вычисление разности расхождений шкал наземных часов, вычисленных на момент  $\Delta\tau_A = \tau_H$  и на момент синхронизации при  $\Delta\tau_A = 0$  (формулы (9) и (8)):

$$(\tau_B - \tau_A)_H - (\tau_B - \tau_A)_0 - \delta\tau_{\Delta f} = \tau_H \frac{g_B \cdot \Delta H_{ORT}}{c^2} + \sqrt{2}\sigma_\tau, \quad (10)$$

где  $\delta\tau_{\Delta f} = (K_1\tau_H + K_2\tau_H^2)$  — паразитный набег времени за счёт начального отклонения и нестабильности частоты мобильных атомных часов АЧ-В на интервале  $\tau_H$ .

Отсюда находим искомое геопотенциальное число и разность ортометрических высот:

$$\Delta C_{AB} = \frac{c^2}{\tau_H} [(\tau_B - \tau_A)_H - (\tau_B - \tau_A)_0 - \delta\tau_{\Delta f}], \quad (11)$$

$$\Delta H_{ORT} = \frac{c^2}{\tau_H g_B} [(\tau_B - \tau_A)_H - (\tau_B - \tau_A)_0 - \delta\tau_{\Delta f}], \quad (12)$$

где разности  $(\tau_B - \tau_A)_H$ ;  $(\tau_B - \tau_A)_0$  являются величинами, измеряемыми в соответствии с формулами (4)–(6); составляющая  $\delta\tau_{\Delta f}$  вычисляется через коэффициенты  $K_1$ ,  $K_2$ , которые найдены в процессе начальной калибровки.

Для оценки погрешности определения разности ортометрических высот рассмотренным методом раскроем формулу (12) с учётом формул (6) и (10):

$$\Delta H_{ORT} = \frac{c^2}{\tau_H g_B} [(\delta\tau_B^{KA} - \delta\tau_A^{KA})_H - (\delta\tau_B^{KA} - \delta\tau_A^{KA})_0 - \delta\tau_{\Delta f}]. \quad (13)$$

Условившись, что все измерения КОС равноточны, отсюда для среднеквадратической погрешности высоты в первом приближении имеем:

$$\sigma H_{ORT} \approx \frac{c^2}{\tau_H g_B} \left[ 4(\sigma\tau_B^{KA})^2 + \left( \frac{\sigma f}{f_A} \tau_H \right)^2 \right]^{0,5}. \quad (14)$$

При накоплении гравитационного эффекта в течение 15 суток ( $\tau_H = 12,96 \cdot 10^5$  с),  $g_B = 9,81$  м/с<sup>2</sup>, при погрешности определения расхождения шкал наземных и космических часов  $\sigma\tau_B^{KA} = 50$  пс, а также при нестабильности  $\sigma f / f_A \approx 10^{-16}$  (водородные квантовые часы при наблюдении в течение 10–15 суток) отсюда получаем:  $\sigma H_{ORT} \approx 0,73$  м.

Полученная погрешность существенно меньше, чем при использовании радиотехнической системы синхронизации «Дуплекс» (около 1 нс [16]), а также при использовании сличения шкал разнесённых атомных часов с помощью ГНСС (0,3 нс [6]).

Поскольку атомные часы в данном случае могут располагаться на расстояниях нескольких тысяч километров, полученная погрешность может быть вполне практически востребованной в интересах геодезии.

Для экспериментальной проверки рассмотренного метода целесообразно использовать КОС «Точка», размещённые, например, в Менделеево и Иркутске. Эти КОС относятся к станциям нового поколения и привязаны к сигналам физической реализации шкал времени местных эталонов времени и частоты, в частности, к шкале Государственного первичного эталона единицы времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018 [15] с погрешностью  $5 \cdot 10^{-16}$  и к Государственному вторичному эталону единиц времени и частоты ВЭТ 1-5 Восточно-Сибирского филиала ФГУП «ВНИИФТРИ» (г. Иркутск). В качестве мобильных атомных часов целесообразно использовать перебазируемые водородные квантовые часы ПКЧВ [16] с нестабильностью  $4,0 \cdot 10^{-15}$ , созданные во ФГУП «ВНИИФТРИ», или перебазируемые водородные квантовые часы ПКЧ-Н с нестабильностью  $3,0 \cdot 10^{-15}$ , созданные в АО «Время-Ч» [17].

### Заключение

Зарубежные и отечественные эксперименты показали высокие потенциальные возможности КОС при определении расхождения шкал наземных и спутниковых атомных часов: достижимый уровень погрешности точности определения величин характеризуется погрешностью в десятки пикосекунд.

Использование отечественных КОС нового поколения, электрически привязанных к шкалам времени пространственно-разнесённых стационарных и мобильных атомных часов, позволяет измерить разность гравитационных потенциалов и соответствующую разность ортометрических высот между точками установки этих эталонов. Это будет первый гравитационный эксперимент с использованием КОС.

В качестве перебазируемых атомных часов целесообразно использовать отечественные водородные квантовые перебазируемые часы ПКЧВ-М и ПКЧ-Н. Ожидаемая погрешность измерения разности высот при существующей точности КОС и точности хранения шкал в перебазируемых атомных часах не превышает метра.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках Научного проекта № 19-29-11023.

### Список литературы

1. IAG Resolutions Adopted by the IAG Council at the XXVI<sup>th</sup> IUGG General Assembly, Prague, Czech Republic, June 22 – July 2, 2015 // International Association of Geodesy — IAG Office Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut Technische Universität München: [website]. — URL: [http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG\\_Resolutions\\_2015.pdf](http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG_Resolutions_2015.pdf).
2. Ландау Л.Д. Теория поля. — М.: Наука, 1967.
3. Müller J., Dirix D., Kopeikin S.M., Lion G. High Performance Clocks and Gravity Field Determination // Space Sci Rev. — 2018. — 214.
4. Фатеев В.Ф. Релятивистская метрология околоземного пространства-времени: монография. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017. — 439 с.
5. Фатеев В.Ф. Релятивистская теория и применение квантового нивелира и сети «Квантовый футшток» // Альманах современной метрологии. — 2020. — № 3. — С. 11–52.
6. Жариков А.И., Сысоев В.П., Рыбаков Е.А., Смирнов Ф.Р., Фатеев В.Ф. Об измерении разности гравитационных потенциалов Земли с помощью перевозимых квантовых часов // Доклады Академии Наук. — 2017. — Т. 472. — № 2. — С. 206–209.
7. Рыбаков Е.А., Фатеев В.Ф. Экспериментальная проверка квантового нивелира на мобильных квантовых часах // Доклады российской академии наук. Физика, технические науки. — 2020. — Т. 495. — С. 34–37.
8. Фатеев В.Ф., Рыбаков Е.А., Смирнов Ф.Р. Метод релятивистской синхронизации мобильных атомных часов и его экспериментальная проверка // Письма в Журнал технической физики. — 2017. — Т. 43. — № 10. — С. 3–11, 91–94.

9. Игнатенко И.Ю., Шлегель В.Р., Жестков А.Г. Метрологические аспекты и неустойчивые факторы, влияющие на результаты лазерно-локационных измерений // Метрология времени и пространства. Материалы IX Международного симпозиума, Менделеево Московской области, 12–14 сентября 2018 г. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2018. — С. 247.
10. Samain E., Guillemot Ph., Exertier P., Albanese D., Berio P., Laurain O., Paris F. Para J., Torre J.-M., Viot H., Vrancken P., Petitbon I., Leon S. Time Transfer by Laser Link — T2L2: First data // Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging. — 2008. — V. 1. — P. 682–689.
11. Cacciapuoti L., Salomon C. Atomic Clock Ensemble in Space // Journal of Physics: Conference Series. — 2011. — V. 327. — 012049.
12. Игнатенко И.Ю., Тряпицын В.Н., Игнатенко Ю.В. Метод определения разности шкал времени бортовых часов ИСЗ и станции лазерной локации // Труды Института прикладной астрономии РАН. — 2018. — № 45. — С. 51–56.
13. Игнатенко И.Ю., Шлегель В.Р., Жестков А.Г., Федотов В.Н., Барышников М.В., Лепёшкин Д.В. Эксперименты по передаче шкалы времени государственного эталона средствами лазерной локации // Метрология времени и пространства. Материалы VIII Международного симпозиума, 14–16 сентября 2016 г., г. Санкт-Петербург. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2016. — С. 102.
14. Блинов И.Ю., Наумов А.В., Капитонов А.Л., Смирнов Ю.Ф., Баух А., Пистер Д. Результаты калибровки канала сравнений шкал времени TWSTFT между ФГУП «ВНИИФТРИ» и РТВ // Доклады VII Международного симпозиума «Метрология времени и пространства», 17–19 сентября 2014. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2015. — С. 257–262.
15. Приказ № 1621 от 31.07.2018 «Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений времени и частоты, ФГУП «ВНИИФТРИ» // Росстандарт: [сайт]. — URL: <https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/38441>.
16. Сысоев В.П., Самохвалов Ю.С., Грачев Н.М., Королев В.П. и др. Перевозимые квантовые часы на основе активного водородного генератора // Метрология времени и пространства. Доклады 6-го Международного симпозиума, 17–19 сентября 2012, Менделеево. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2013. — С. 126–139.
17. Смирнов Ф.Р., Жариков А.И. Эталон-переносчик нового поколения для высокоточного сравнения шкал времени // Альманах современной метрологии. — 2018. — № 15. — С. 17–30.

*Статья поступила в редакцию: 26.10.2021 г.*

*Статья прошла рецензирование: 18.01.2022 г.*

*Статья принята в работу: 16.02.2022 г.*