

# Стандарты частоты на ультрахолодных атомах в тестах общей теории относительности, навигации и гравиметрии

К.Ю.Хабарова, К.С.Кудеяров, Н.Н.Колачевский

*Исследования и разработки в области создания оптических часов на ультрахолодных атомах и ионах привели к снижению относительной погрешности частоты вплоть до единиц в 18-м знаке после запятой. Использование новых высокоточных методов сличения частот открывает новые возможности при проведении фундаментальных исследований (чувствительные тесты общей теории относительности, поиск дрейфа фундаментальных констант, поиск «темной материи»), а также в современной навигации и гравиметрии. В работе обсуждаются основные методы, используемые при создании высокоточных часов (в том числе транспортируемых) на основе ультрахолодных атомов и ионов, и возможность их использования в современных задачах релятивистской гравиметрии.*

**Ключевые слова:** ультрахолодные атомы и ионы, оптические часы, общая теория относительности, релятивистская гравиметрия.

## 1. Введение

Основные уравнения общей теории относительности (ОТО), предложенные Эйнштейном в 1915 г., связывают геометрию пространства-времени с материей и ее движением, трактуя гравитационное взаимодействие как кривизну пространства-времени. Существенную роль при возникновении ОТО сыграли два ключевых эксперимента: эксперимент Майкельсона–Морли (1887 г.), доказавший изотропию и постоянство скорости распространения электромагнитных волн, и опыт Этвеша (1890 г.), показавший эквивалентность инерциальной и гравитационной масс. Сразу после возникновения ОТО получила блестящее подтверждение, дав объяснение двум эффектам: смещению перигелия Меркурия (Эйнштейн, Шварцшильд, 1915–16 гг.) и гравитационному отклонению света (Эддингтон, 1919 г.). Одним из предсказанных ОТО и не наблюдавшихся ранее эффектов явилось гравитационное смещение частоты излучения и замедление времени в гравитационном поле. Однако, ввиду почти полного отсутствия новых наблюдений и экспериментов вплоть до 60-х годов прошлого века, многие предсказания ОТО начали подвергаться скепсису.

Золотой век ОТО ознаменован обнаружением пульсаров в двойных системах (Халс, Тейлор, 1976 г.), открывшим уникальную возможность наблюдать поведение

природных миллисекундных часов, движущихся в сильном гравитационном поле, а также рядом наземных экспериментов. Ключевыми экспериментами явились работы Хафеле и Китинга (1971 г.) по сличению высокоточных цезиевых часов, облетевших вокруг Земли по разным направлениям, а также эксперимент Gravity Probe A (1976 г.). Сегодня ОТО широко используется при решении задач астрономии и спутниковой навигации. Среди активно развивающихся направлений можно упомянуть физику сильных гравитационных полей, физику гравитационных волн, а также ряд прикладных задач, которые являются целью обсуждения данной работы.

К следствиям ОТО относится замедление времени в гравитационном поле, а также эффект гравитационного смещения частоты. Оба эффекта имеют порядок  $\Delta U/c^2$  (где  $\Delta U$  – вариация гравитационного потенциала) и могут достигать относительных значений порядка  $10^{-10}$  в околоземном пространстве. Соответственно, возникает необходимость учитывать эти эффекты в задачах навигации и синхронизации разнесенных по высоте часов. Для стандартов с относительной неопределенностью частоты сигнала  $\sim 10^{-14}$ – $10^{-15}$  гравитационные эффекты учитываются путем точного измерения разности высот на основе классических методов нивелирования и дальнометрии. Учитывая, что вблизи земной поверхности поправка из-за разности высот составляет всего  $10^{-16}$  м<sup>-1</sup>, этот подход оказывается пригодным для большинства приложений.

Развитие стандартов частоты и методов их сличения уже сегодня открывает возможность обращения задачи, позволяя с высокой точностью измерять разность гравитационных потенциалов и, соответственно, разность высот объектов на поверхности Земли. В ведущих лабораториях мира (США, Япония, Германия) созданы оптические стандарты частоты, относительная погрешность частоты которых достигает единиц в 18-м знаке [1, 2]. Созданы транспортируемые оптические часы на ультрахолодных атомах с относительной погрешностью менее  $10^{-16}$  (см. работу [3] и приведенные в ней ссылки). В ряде российских научных центров также ведутся разработки вы-

**Н.Н.Колачевский, К.Ю.Хабарова.** Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» Россия, Московская обл., 141570 Менделеево; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: kolachevsky@lebedev.ru, kseniakhabarova@gmail.com  
**К.С.Кудеяров.** Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: kost1994@yandex.ru

сокоточных оптических часов: во ВНИИФТРИ создается оптический стандарт на ультрахолодных атомах стронция с относительной погрешностью  $10^{-17}$ .

В ряде стран продемонстрирована возможность сличения оптических стандартов частоты с помощью стабилизированных оптоволоконных линий связи с относительной погрешностью на уровне  $10^{-19}$  на расстояниях вплоть до 2000 км. В 2016 г. впервые показана возможность сличения оптических часов по открытым каналам, в том числе через спутник [4]. Эти методы позволяют выполнять сличение оптических часов с относительной неопределенностью  $10^{-18}$  при времени усреднения около 1000 с. Формируется европейская сеть, в которую будут входить существующие стандарты и каналы связи [3].

Высокая точность и стабильность стандартов частоты нового типа позволяют использовать их в задачах гравиметрии. В работе [5] на основе сличения двух идентичных стронциевых часов, разнесенных на расстояние 15 км и соединенных оптоволоконной линией, были выполнены измерения относительной разности их высот. Разность высот вычислялась с использованием методов ОТО, погрешность ее определения составила 5 см. Таким образом, был экспериментально продемонстрирован новый метод определения разности высот, конкурирующий с лучшими методами классической геодезии.

Сличение идентичных стандартов частоты в рамках глобальной сети [3] позволяет определять разность гравитационных потенциалов в континентальном масштабе с погрешностью порядка 1 см. Выполнены первые эксперименты в рамках международного проекта ИТОС [6], нацеленного на решение именно этой задачи.

Ниже приведены примеры использования результатов ОТО при сличении стандартов частоты, представлены достижения в области разработки и сличения оптических часов, а также показаны возможности определения релятивистского геоида с их использованием.

## 2. Эффекты ОТО в околоземном пространстве

Поскольку гравитационный потенциал  $U$  вблизи земной поверхности мал, в инерциальной невращающейся системе отсчета метрика пространства-времени может быть представлена как

$$g_{00} = -\left(1 - \frac{2U}{c^2}\right), \quad g_{ij} = \left(1 + \frac{2U}{c^2}\right)\delta_{ij}, \quad (1)$$

отличаясь от метрики Минковского членами  $2U/c^2$  (здесь  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера). Гравитационный потенциал  $U$  формируется за счет потенциала Земли  $U_E$  и приливного потенциала  $U_T$  ( $U = U_E + U_T$ ). Если ограничиться низшими гармониками, то потенциал Земли можно представить в виде

$$U_E = \frac{GM_E}{R} + J_2 GM_E \alpha_1 \frac{1 - \sin^2 \theta}{2R^3} + \dots, \quad (2)$$

где  $GM_E$  – произведение гравитационной постоянной на массу Земли;  $R$  – расстояние до центра Земли. В этом приближении Земля является эллипсоидом, сплюснутым вдоль земной оси за счет вращения, с квадрупольным коэффициентом  $J_2$  и большой полуосью  $a_1$  ( $\theta$  – полярный угол). На поверхности Земли гравитационный потенциал

$U_E = 6.2 \times 10^7 \text{ м}^2/\text{с}^2$ , а приливный потенциал, формирующийся в основном за счет сопоставимых по величине вкладов от Солнца и Луны,  $U_T \sim 10^{-7} U_E$ .

Поверхность с постоянным гравитационным потенциалом с учетом центробежного потенциала, возникающим за счет вращения Земли, называется земным геоидом, который близок, но не совпадает с поверхностью Мирового океана. В определении геоида приливные явления не учитываются. Форма геоида является вычисляемой величиной, она определяется с учетом гравитационных аномалий и существенно отличается от поверхности континентов. Для точного определения поверхности геоида была реализована космическая миссия Gravity Recovery And Climate Experiment (GRACE, 2002 г.), принцип работы которой основан на прецизионной лазерной дальнометрии двух разнесенных (на расстояние 200 км) спутников, находящихся на низкой орбите (500 км). Это позволяет измерять гравитационные аномалии вплоть до 120-й сферической гармоники. Средняя погрешность определения геоида с использованием данных GRACE составляет немного менее 1 см [7]. Форма геоида может быть уточнена на основе карт ускорения свободного падения  $g$ . Важно отметить, что спутниковые системы глобальной космической навигации (ГНСС) позволяют определять высоту относительно опорного геоцентрического эллипсоида, не совпадающего с геоидом.

Следствиями ОТО являются изменение частоты электромагнитных волн и изменение хода времени в гравитационном поле. Используя (1), можно получить, что при распространении волны в гравитационном поле ее частота изменится согласно выражению

$$v' = v \left(1 + \frac{U' - U}{c^2}\right), \quad (3)$$

т. е. с приближением к центру гравитации частота волны увеличивается. В свою очередь, ход времени вблизи массивных тел замедляется:

$$t' = t \left(1 - \frac{U' - U}{c^2}\right). \quad (4)$$

В начале развития ОТО экспериментальная проверка этих эффектов была невозможна из-за невысокой точности измерений, а также влияния движения тел (эффекта Доплера, дилатации времени и эффекта Саньяка).

Одним из наиболее точных измерений, нацеленных на проверку эффектов ОТО (3) и (4), был запуск в 1976 г. активного водородного мазера на борту суборбитальной ракеты Gravity Probe A на высоту около 10000 км, при этом его частота сличалась с наземным стандартом [8]. Удалось протестировать возможные нарушения равенств (3), (4) на уровне  $7 \times 10^{-5}$  в относительных единицах, что до сих пор является одним из наиболее чувствительных тестов принципа эквивалентности. Выражение (3) можно получить при рассмотрении «лифта Эйнштейна», что указывает на эквивалентность влияния гравитации и доплеровского сдвига в ньютоновском приближении.

В астрофизике эффект замедления времени (задержка Шапиро) наблюдается, например, при хронометрии пульсаров в системе двойных звезд. Импульсный сигнал пульсара, проходящий вблизи гравитационного поля двойника, замедляется, что приводит к хорошо наблюда-

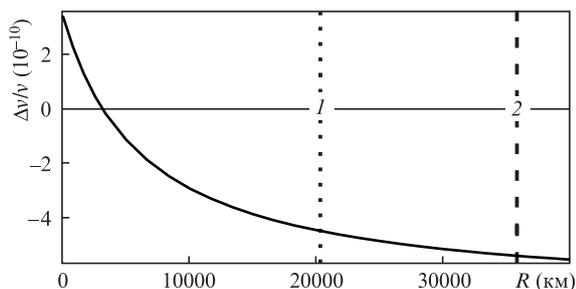


Рис.1. Коррекция частоты бортового стандарта для спутника, находящегося на круговой орбите, необходимая для синхронизации с наблюдателем на поверхности Земли, в зависимости от высоты орбиты  $R_{orb}$ . Показаны орбиты спутников ГНСС (1) и геостационарных спутников (2).

емому эффекту замедления на уровне десятков микросекунд [9].

Выражения (3) и (4) широко используются и на практике. В космических приложениях необходимо упомянуть работу спутниковых систем ГНСС (ГЛОНАСС, GPS и пр.), высота орбитальной группировки которых составляет около 20000 км. Поскольку работа ГНСС основывается на сличении сигналов времени бортовых часов с наземными, необходимо вводить коррекцию частоты с движением спутников (дилатация времени). Оба эффекта сопоставимы по величине и противоположны по знаку [10]. Для синхронизации бортовых и наземных часов в бортовую систему вводится поправка, составляющая  $-4.5 \times 10^{-10}$  в относительных единицах (рис.1).

В качестве другого примера можно привести функционирующую космическую лабораторию – радиотелескоп «Радиоастрон» (ФИАН), на борту которого находится активный водородный лазер. Поскольку спутник движется по сильно вытянутой эллиптической орбите, гравитационный эффект от поля Земли не является постоянным во времени. После компенсации эффекта Доплера наблюдаемое смещение частоты из-за действия гравитационного поля составляет вплоть до 3 Гц при несущей частоте 8.4 ГГц. Ожидается, что высокоточные фазовые сличения с наземными стандартами частоты позволят выполнить проверку равенства (4) с чувствительностью  $2.5 \times 10^{-5}$  [11], что уточняет результат миссии GRA [8].

Изменение хода часов наблюдается и при сличении наземных стандартов. Учитывая, что относительная погрешность первичных стандартов частоты – цезиевых фонтанов – приблизилась к  $2 \times 10^{-16}$  [12], их сличение требует знания относительных высот не хуже 1 м. Учитывая, что рельеф поверхности Земли допускает перепад вплоть до нескольких тысяч метров, временные поправки (4) являются неотъемлемой частью при дистанционном сличении стандартов (по дуплексной связи, посредством ГНСС, по оптоволоконным линиям и пр.).

В качестве примера можно привести одно из первых высокоточных измерений оптической частоты перехода 1S–2S в атоме водорода, выполненных относительно частоты удаленного цезиевого фонтана совместным коллективом Института квантовой оптики общества Макса Планка (MPQ), ФИАНа и Метрологического института Германии (PTB) [13]. Предыдущие измерения (см. [14]) выполнялись с использованием транспортируемого цезиевого фонтана FOM, который был любезно предоставлен лабораторией LNE-SYRTE. В 2012 г. между PTB и



Рис.2. Схема сличения частоты оптического перехода 1S–2S в атоме водорода (MPQ) с частотой транспортируемого первичного цезиевого стандарта FOM, а также с частотой удаленного фонтана Cs1 (PTB) с использованием 920-километровой оптоволоконной линии связи. При сличении с сигналом Cs1 было учтено гравитационное смещение частоты за счет разницы высот MPQ и PTB, составившее  $4.4 \times 10^{-14}$ . Оба измерения абсолютной частоты MPQ-FOM [13] и MPQ-PTB [14] показали совпадение в пределах погрешности  $5 \times 10^{-15}$ .

MPQ создан оптоволоконный канал связи длиной 920 км (по прямой расстояние между PTB и MPQ составляет 460 км), позволяющий выполнять высокоточные сличения в оптическом и радиочастотном диапазонах [15]. Открылась возможность выполнить измерение частоты 1S–2S в атоме водорода относительно частоты первичного национального стандарта PTB – цезиевого фонтана Cs1. При измерении потребовалось учесть разность высот PTB (Брауншвейг) и MPQ (Мюнхен), составляющую 452 м (рис.2) и внести соответствующую коррекцию смещения частоты в  $4.4 \times 10^{-14}$ . Частота перехода в атоме водорода была определена с погрешностью 11 Гц ( $4.5 \times 10^{-15}$  в относительных единицах). Полученная абсолютная частота совпала в пределах погрешности с результатом предыдущего измерения [14], выполненного с использованием мобильного фонтана FOM.

В последние годы был выполнен ряд более точных сличений удаленных друг от друга стандартов, включая сличение оптических часов с погрешностью измерений  $5 \times 10^{-17}$ . Для таких сличений существующие геодезические методы пока обладают достаточной точностью и позволяют вносить релятивистскую коррекцию (4) с использованием информации о разности высот и, соответственно, разности гравитационных потенциалов без существенного влияния на бюджет неопределенности. Однако достижение точности выше  $10^{-17}$  требует знания относительной высоты часов с точностью лучше 10 см, что для удаленных часов представляет существенную проблему. С другой стороны, появляется возможность обратить задачу и использовать идентичные высокоточные часы для определения разности гравитационных потенциалов и высот [16].

### 3. Оптические часы с погрешностью частоты менее $10^{-17}$ и методы их сличения

Последние несколько лет ознаменованы созданием ряда стационарных оптических часов, погрешность воспроизведения частоты которых составляет менее  $10^{-17}$ . К ним относятся часы на нейтральных атомах, загруженных в оптические решетки (см., напр., [1, 2]), а также часы на одиночных ионах (см., напр., [17, 18]). Детальный обзор оптических часов приведен в [19]. На коротких временах порядка 1 с относительная нестабильность таких часов определяется спектральными характеристиками ла-

зерной системы, возбуждающей переход, и может достигать  $10^{-16}$  [20]. При этом частота лазера активно стабилизируется относительно пика пропускания ультрастабильного оптического резонатора. На более длинных интервалах времени стабильность частоты лазера определяется частотой перехода в лазерно-охлажденном атоме или ионе. Часы на оптических решетках [1, 2] демонстрируют лучшие характеристики относительной нестабильности за счет большого количества атомов, взаимодействующих с излучением. Типичная относительная нестабильность лучших оптических часов на решетках зависит от времени усреднения  $\tau$  (в секундах) как  $5 \times 10^{-16} (\tau/c)^{-1/2}$  [2], что позволяет достичь уровня  $10^{-18}$  за несколько часов усреднения. Ионные стандарты обладают несколько худшими показателями стабильности, однако конкурируют со стандартами на нейтральных атомах по точностным характеристикам, поскольку одиночный ион в ловушке Пауля слабо подвержен внешним возмущениям. Кроме того, ионные ловушки компактны (объем до  $1 \text{ дм}^3$ ) и менее чувствительны к настройкам охлаждающих и опрашивающих лазерных полей.

В России создаются оптические часы на ультрахолодных атомах стронция с относительной погрешностью частоты на уровне  $10^{-17}$  (ВНИИФТРИ) [21]. Ведутся работы по созданию оптических часов на одиночных ионах иттербия (ИЛФ) [22], алюминия (ФИАН) [23], а также на нейтральных атомах тулия (ФИАН) [24].

Как видно из рис.3, методы, использующиеся для сличения удаленных микроволновых стандартов частоты (дуплекс, ГНСС) не позволяют проводить сличения оптических стандартов частоты с точностью лучше 16-го знака после запятой. Это связано с атмосферными флуктуациями, задержками и большим требуемым временем накопления сигнала.

В свою очередь разработаны и реализованы методы синхронизации с использованием активно стабилизированных оптоволокон. В качестве примеров синхронизации частоты в континентальном масштабе можно привести работы [15, 19]. За счет методов активной стабилизации и передачи информации с использованием фазы оптической несущей достигается нестабильность переда-

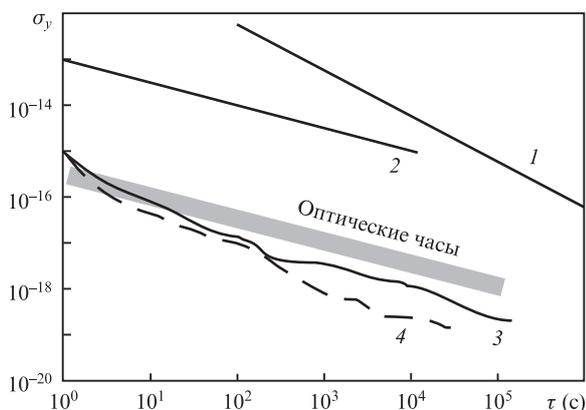


Рис.3. Относительная нестабильность (аллановская девиация,  $\sigma_y$ ), вносимая различными каналами передачи сигналов, использующихся для сличения стандартов: 1 – сличение с использованием ГНСС (фаза несущей); 2 – дуплекс (TWSTFT); 3 – длинное (свыше 1000 км) оптоволоконно с использованием фазы несущей; 4 – оптический спутниковый канал (фаза несущей). Серой полосой показаны типичные характеристики лучших оптических часов на нейтральных атомах в решетках.

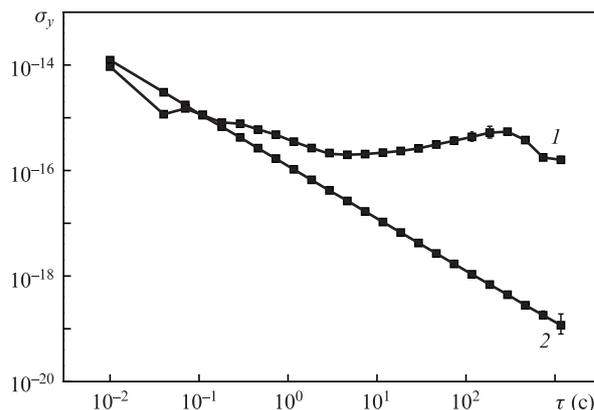


Рис.4. Относительная нестабильность в терминах аллановской девиации  $\sigma_y$ , вносимая короткой (30 м) оптоволоконной линией связи: 1 – линия без активной стабилизации; 2 – линия активно стабилизирована.

чи частоты на уровне единиц в 19-м знаке (кривая 3 на рис.3). Этого оказывается достаточно для сличения оптических часов без потери точности. Сеть волоконных каналов связи между ведущими метрологическими центрами в Европе постоянно развивается, используются как выделенные, так и обычные Интернет-каналы с соответствующей модификацией. Обзор данного направления представлен в работе [25].

Другая возможность заключается в сличении стандартов в оптическом диапазоне по открытому каналу, через спутник. Принцип работы аналогичен сличению сигналов по оптическому волокну, что позволяет уменьшить количество промежуточных усилительных станций. Первые экспериментальные работы в этом направлении [4] показали, что возможности сличения по открытому каналу не уступают по своим характеристикам оптоволоконному сличению. Необходимо, однако, отметить, что метод может оказаться весьма чувствительным к внешним условиям и пока не апробирован с использованием спутниковой связи.

В ФИАНе ведутся работы по созданию стабилизированной оптоволоконной линии связи с использованием информации о фазе оптической несущей. На примере короткой линии длиной 30 м показано, что нестабильность частоты при использовании активной стабилизации достигает  $10^{-19}$  после усреднения в течение 1000 с (рис.4). В настоящее время ведется исследование характеристик передачи сигнала по длинному (4 км) оптоволокну с использованием излучения стабилизированного по частоте лазера. Из рис.4 видно, что достигнутые характеристики не уступают лучшим результатам, полученным на сегодняшний день в мире. Аналогичные работы ведутся в ИЛФ СО РАН.

#### 4. Транспортируемые оптические стандарты частоты

Альтернативным методом сличения частот и верификации различных стандартов частоты является использование транспортируемых стандартов. Единственный транспортируемый цезиевый фонтан FOM [26] использовался в широком круге интернациональных сличений и тестов фундаментальных теорий, полностью оправдав свое создание. Несомненно, создание транспортируемых систем является по-своему более сложной задачей, чем

создание стационарных часов, поскольку требует компактных решений, высокой надежности, механической стабильности и устойчивости к внешним возмущениям.

В настоящее время создано несколько транспортируемых оптических стандартов, уже превосходящих фонтан FOM по своим характеристикам. Так, в РТВ создан и охарактеризован транспортируемый (объемом несколько кубометров) оптический стандарт частоты на ультрахолодных атомах стронция в оптической решетке [27]. Стандарт помещается в закрытый прицеп легкового автомобиля. При заявленной нестабильности частоты в  $1.3 \times 10^{-15} (\tau/c)^{-1/2}$  стандарт обладает погрешностью частоты  $7 \times 10^{-17}$ . В рамках проекта ИОС было проведено его сличение с удаленным первичным стандартом частоты [6].

В свою очередь, в Китае создан и охарактеризован компактный транспортируемый стандарт на ионах  $\text{Ca}^+$  [28]. Стандарт имеет модульный дизайн и занимает объем около  $1 \text{ м}^3$ . Несмотря на худшую нестабильность, равную  $2.3 \times 10^{-14} (\tau/c)^{-1/2}$ , стандарт конкурирует по точности ( $7.7 \times 10^{-17}$ ) со стронциевым стандартом РТВ.

Создание транспортируемых оптических стандартов по уровню точности лучше  $10^{-16}$  (предел, который может быть достигнут с использованием цезиевых фонтанов) ведется рядом стран и преследует несколько целей, одной из которых является разработка синхронизованной сети оптических часов и модели релятивистского геоида. Кроме того, модульная сборка и высокая компактность представленных моделей является важным шагом на пути к созданию бортовых космических оптических стандартов. Отметим, что уже реализован ряд успешных суборбитальных запусков: в 2015 г. реализован запуск фемтосекундной гребенки оптических частот, стабилизированной по рубидиевому стандарту частоты [29], а в январе 2017 г. на борту ракеты впервые создан конденсат Бозе–Эйнштейна (проект MAIUS-1) [30]. Это указывает на высокую техническую готовность реализации высокоточных оптических часов на орбите Земли, что позволит на порядки повысить точность синхронизации сигналов времени и частоты орбитальных группировок и открывает дополнительные возможности для реализации задач релятивистской геодезии.

## 5. Перспективы применения в релятивистской геодезии

Впервые с использованием атомных часов в лаборатории эффект гравитационного замедления времени был продемонстрирован при сличении двух идентичных оптических часов на одиночных ионах алюминия [31]. В процессе эксперимента одна из вакуумных камер с ионом была приподнята относительно другой на 33 см, что привело к относительному сдвигу частоты, равному  $(4.1 \pm 1.6) \times 10^{-17}$ . Этот эксперимент положил начало новому практическому направлению, в основе которого лежат высокоточные стандарты частоты, – релятивистской геодезии. Конечно, учитывая достигнутую сегодня точность нивелирования, а также точность определения геоида и опорного эллипсоида (несколько сантиметров), серьезная конкуренция перечисленным методам возможна лишь при достижении точности часов на уровне единиц в 18-м знаке.

В основе метода лежит определение геоида как эквипотенциальной поверхности с потенциалом  $U_0$  (рис.5). Согласно выражению (4) часы, расположенные на этой

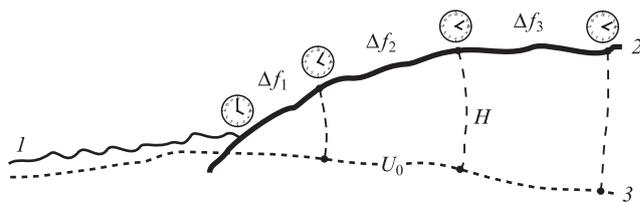


Рис.5. Метод прямого определения ортометрической высоты  $H$  с использованием высокоточных часов: 1 – поверхность океана; 2 – поверхность суши; 3 – поверхность геоида с постоянным гравитационным потенциалом  $U_0$ .

поверхности, будут показывать одинаковый ход времени. Таким образом, имея набор высокоточных часов и каналов сличения, можно восстановить форму геоида, так называемый релятивистский геоид. Соответственно, можно выполнять измерения высоты  $H$  относительно геоида, пользуясь выражением

$$H = \frac{U - U_0}{g}, \quad (5)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения в исследуемой точке. Одним из несомненных достоинств этого метода является возможность непосредственного определения гравитационного потенциала без необходимости интегрирования  $g$  вдоль траектории движения. Несмотря на то что  $g$  может быть измерено с относительной погрешностью вплоть до единиц микрогал, интегрирование сопряжено с накоплением значительных ошибок. То же относится и к методам нивелирования, погрешность которых растет примерно как корень квадратный из расстояния между точками. Помимо этого, сличение часов требует гораздо меньшего времени интегрирования ( $10^3 - 10^4$  с) и может быть использовано для исследования динамических процессов, в то время как существующие гравитационные карты являются по сути статическими.

Одним из важных шагов в сторону формирования методов релятивистской геодезии с использованием оптических часов является эксперимент, проведенный в 2015 г. в Японии группой Катори [5]. В работе выполнено сличение нескольких криогенных оптических часов на атомах стронция в оптической решетке. Сравнение проводилось между часами Токийского университета и метрологического института RIKEN, находящимися на расстоянии 15 км друг от друга; высота институтов над уровнем моря отличалась примерно на 15 м. Учитывая, что относительная точность часов составила  $4 \times 10^{-18}$ , а оптоволоконная линия связи не вносила дополнительной погрешности, было установлено, что разность гравитационных потенциалов составляет  $-148.55 \pm 0.53 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ; это соответствует погрешности определения разности высот в 5 см. Результат измерения с использованием часов совпал с результатом, полученным методом нивелирования ( $-148.14 \pm 0.06 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ). Преимущество по точности метода нивелирования возникает в данном случае из-за относительно небольшого расстояния между часами.

Нивелирование не позволяет отслеживать динамические изменения потенциала, которые могут быть вызваны, например, подвижками земной коры. При достигнутых точностях существенными являются приливные потенциалы, влияние которых подробно рассмотрено в работе [32]. Их влияние будет возрастать с увеличением расстояния между сравниваемыми часами.

## 6. Заключение

Интенсивные исследования, выполненные в течение последнего десятилетия в направлении развития оптических часов, привели к тому, что достижение относительной погрешности частоты на уровне единицы в 17-м знаке превратилось, по сути, в техническую задачу. Безусловно, решение этой задачи требует концентрированного труда специалистов и значительных ресурсов. Также в техническую плоскость вышло и сличение удаленных стандартов с использованием оптоволоконных линий. В Европе активно развивается сеть оптических и микроволновых стандартов [6], ключевыми задачами которой являются формирование шкалы времени с погрешностью на уровне  $10^{-17}$  и, как следствие, начало работ по формированию концепции релятивистского геоида. Последний станет важным дополнением к существующим геодезическим методам, и, возможно, в короткой перспективе составит им серьезную конкуренцию.

Для расширения возможностей сети в настоящее время создан ряд транспортируемых стандартов, точность которых перешагнула за 16-й знак и продолжает повышаться. С использованием оптических часов экспериментально продемонстрированы возможности хронометрической геодезии, позволяющие определять разность высот с погрешностью 5 см. В Европе осуществлен ряд ключевых тестовых экспериментов на борту космических аппаратов, открывающих возможность запуска оптических часов на орбиту Земли. К сожалению, работы по созданию как транспортируемого стандарта, так и элементов бортовой аппаратуры в России пока не начаты.

В короткой перспективе высокоточные оптические часы на борту космического аппарата с точно определенной орбитой могут расширить возможности навигации как для повышения синхронизации космической группировки ГНСС, так и для формирования опорной орбиты для точных измерений гравитационного потенциала.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-12-00096).

- Schioppo M., Brown R.C., McGrew W.F., Hinkley N., Fasano R.J., Belay K., Yoon T.H., Milani G., Nicolodi D., Sherman J.A., Phillips N.B., Oates C.W., Ludlow A.D. *Nat. Photon.*, **11**, 48 (2017).
- Ushijima I., Takamoto M., Das M., Ohkubo T., Katori H. *Nat. Photon.*, **9**, 185 (2015).
- Riehle F. *Nat. Photon.*, **11**, 25 (2017).
- Deschênes J.-D., Sinclair L.C., Giorgetta F.R., Swann W.C., Baumann E., Bergeron H., Cermak M., Coddington I., Newbury N.R. *Phys. Rev. X*, **6**, 021016 (2016).
- Takano T., Takamoto M., Ushijima I., Ohmae N., Akatsuka T., Yamaguchi A., Kuroishi Y., Munekane H., Miyahara B., Katori H. *Nat. Photon.*, **10**, 662 (2016).
- <http://projects.npl.co.uk/itoc/project-structure/reg/gravity-potential>
- Tapley B., Ries J., Bettadpur S., Chambers D., Cheng M., Condi F., Gunter B., Kang Z., Nagel P., Pastor R., Pekker T., Poole S., Wang F. *J. Geod.*, **79**, 467 (2005).
- Vessot R.F.C., Levine M.W., Mattison E.M., Blomberg E.L., Hoffman T.E., Nystrom G.U., Farrel B.F., Decher R., Eby P.B., Baugher C.R., Watts J.W., Teuber D.L., Wills F.D. *Phys. Rev. Lett.*, **45**, 2081 (1980).
- Kramer M., Stairs I.H., Manchester R.N., McLaughlin M.A., Lyne A.G., Ferdman R.D., Burgay M., Lorimer D.R., Possenti A., D'Amico N., Sarkissian J.M., Hobbs G.B., Reynolds J.E., Freire P.C.C., Camilo F. *Science*, **314**, 97 (2006).
- Риле Ф. *Стандарты частоты. Принципы и приложения* (М.: Физматлит, 2009).
- Бирюков А.В., Кауц В.Л., Кулагин В.В., Литвинов Д.А., Руденко В.Н. *Астрономич. журн.*, **91**, 887 (2014).
- Levi F., Calonico D., Calosso C.E., Godone A., Micalizio S., Costanzo G.A. *Metrologia*, **51**, 270 (2014).
- Matveev A., Parthey C.G., Predehl K., Alnis J., Beyer A., Holzwarth R., Udem Th., Wilken T., Kolachevsky N., Abgrall M., Rovera D., Salomon C., Laurent P., Grosche G., Terra O., Legero T., Schnatz H., Weyers S., Altschul B., Hänsch T.W. *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 230801 (2013).
- Parthey C.G., Matveev A., Alnis J., Bernhardt B., Beyer A., Holzwarth R., Maistrou A., Pohl R., Predehl K., Udem Th., Wilken T., Kolachevsky N., Abgrall M., Rovera D., Salomon C., Laurent P., Hänsch T.W. *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 203001 (2011).
- Predehl K., Grosche G., Raupach S.M.F., Droste S., Terra O., Alnis J., Legero T., Hänsch T.W., Udem Th., Holzwarth R., Schnatz H. *Science*, **336**, 441 (2012).
- Lisdat C., Grosche G., Quintin N., Shi C., Raupach S.M.F., Grebing C., Nicolodi D., Stefani F., Al-Masoudi A., Dörscher S., Häfner S., Robyr J.-L., Chiodo N., Bilicki S., Bookjans E., Koczwar A., Koke S., Kuhl A., Wiotte F., Meynadier F., Camisard E., Abgrall M., Lours M., Legero T., Schnatz H., Sterr U., Denker H., Chardonnet C., Le Coq Y., Santarelli G., Amy-Klein A., Le Targat R., Lodewyck J., Lopez O., Pottier P.-E. *Nat. Commun.*, **7**, 12443 (2016).
- Chou C.W., Hume D.B., Koelemeij J., Wineland D.J., Rosenband T. *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 070802 (2010).
- Huntemann N., Sanner C., Lipphardt B., Tamm Chr., Peik E. *Phys. Rev. Lett.*, **116**, 063001 (2016).
- Ludlow A.D., Boyd M.M., Ye J., Peik E., Schmidt P.O. *Rev. Mod. Phys.*, **87**, 637 (2015).
- Matei D.G., Legero T., Häfner S., Grebing C., Weyrich R., Zhang W., Sonderhouse L., Robinson J.M., Ye J., Riehle F., Sterr U. arXiv:1702.04669.
- Хабарова К.Ю., Галышев А.А., Стрелкин С.А., Костин А.С., Белотелов Г.С., Бердасов О.И., Грибов А., Колачевский Н.Н., Слюсарев С.Н. *Квантовая электроника*, **45**, 166 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 166 (2015)].
- Чепуров С.В., Луговой А.А., Кузнецов С.Н. *Квантовая электроника*, **44**, 527 (2014) [*Quantum Electron.*, **44**, 527 (2014)].
- Семериков И.А., Заливако И.В., Шпаковский Т.В., Борисенко А.С., Хабарова К.Ю., Сорокин В.Н., Колачевский Н.Н. *Квантовая электроника*, **46**, 935 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 935 (2016)].
- Sukachev D., Fedorov S., Tolstikhina I., Tregubov D., Kalganova E., Vishnyakova G., Golovizin A., Kolachevsky N., Khabarova K., Sorokin V. *Phys. Rev. A*, **94**, 022512 (2016).
- Хабарова К.Ю., Калганова Е.С., Колачевский Н.Н. *УФН* (в печати, 2017).
- Vian C., Rosenbusch P., Marion H., Bize S., Cacciapuoti L., Zhang S., Abgrall M., Chambon D., Maksimovic I., Laurent P., Santarelli G., Clairon A., Luiten A., Tobar M., Salomon C. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **54**, 833 (2005).
- Koller S.B., Grotti J., Vogt St., Al-Masoudi A., Dörscher S., Häfner S., Sterr U., Lisdat Ch. *Phys. Rev. Lett.*, **118**, 073601 (2017).
- Cao J., Zhang P., Shang J., Cui K., Yuan J., Chao S., Wang S., Shu H., Huangar X. arXiv:1607.03731.
- Lezius M., Wilken T., Deutsch C., Giunta M., Mandel O., Thaller A., Schkolnik V., Schiemangk M., Dinkelaker A., Kohfeldt A., Wicht A., Krutzik M., Peters A., Hellmig O., Duncker H., Sengstock K., Windpassinger P., Lampmann K., Hülsing T., Hänsch T.W., Holzwarth R. *Optica*, **3**, 1381 (2016).
- <http://www.scspace.com/missions-projects/ongoing/maius-1>
- Chou C., Hume D., Rosenband T., Wineland D. *Science*, **329**, 1630 (2010).
- Voigt C., Denker H., Timmen L. *Metrologia*, **53**, 1365 (2016).