

АБСОЛЮТНЫЙ БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ ГРАВИМЕТР АБГ-ВНИИМ -1 РАЗРАБОТКИ ВНИИМ ИМЕНИ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

Во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д.И.Менделеева создан абсолютный баллистический гравиметр АБГ-ВНИИМ-1. В разработке применены оригинальные конструкции баллистического блока, стабилизированного по частоте компактного твердотельного Nd:YVO₄/КТР лазера с диодной накачкой, на длине волны 532 нм. Разработано программное обеспечение GROT для управления системами и вычисления ускорения свободного падения пробного тела по измеренным интервалам пути и времени. Полная инструментальная погрешность АБГ-ВНИИМ-1 составляет $2 \cdot 10^{-8} \text{ мс}^{-2}$.

1. Введение

Абсолютный баллистический гравиметр (АБГ) реализует свободное движение пробного тела (ПТ) в гравитационном поле (результатирующем поле гравитационной и центробежной сил) на гравиметрическом пункте на Земле. Параметры движения (интервалы пути и времени) измеряются с помощью лазерного интерферометра и системы измерения временных интервалов. Ускорение свободного падения (ускорение силы тяжести) (УСП) g оценивается исходя из уравнения движения пробного тела [1–3]. Методика измерения, описанная выше, представляет собой первичную референтную методику [4] (см также сайт: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html> Международного бюро мер и весов (BIPM)). Чтобы относительная погрешность измерения g достигала нескольких единиц 10^9 (нескольких единиц 10^{-8} мс^{-2}), погрешность измерения перемещений должна составлять менее 1 нм. Относительная погрешность измерения на малых интервалах времени свободного падения не должна превышать 5×10^{-10} .

Высокая точность измерения пути и времени крайне важна для АБГ, но непосредственная калибровка лазерного интерферометра перемещений невозможна в силу конструкции АБГ и сложности достижения требуемой точности калибровки.

Обычно калибруются только частота лазера, используемого в лазерном интерферометре перемещений, и частота опорного генератора (например, рубидиевого генератора частоты), используемого в системе измерения временных интервалов АБГ. Это является необходимым, но недостаточным для обеспечения единства измерения интервалов времени и пути на всех диапазонах измерения. Например, опорные генераторы калибруются на временных

Витушкин Леонид Федорович. Доктор технических наук, начальник лаборатории Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д.И.Менделеева, С-Петербург.

Орлов Олег Александрович. Кандидат технических наук, руководитель секции Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д.И.Менделеева.

Статья по докладу на Симпозиуме международной ассоциации по геодезии (IAG) «Наземная, морская и аэрогравиметрия: измерения на неподвижных и подвижных основаниях» 17-20 сентября 2013 г.

интервалах в десятки минут, а интервалы времени, измеренные во время свободного падения пробного тела в АБГ, варьируются в пределах от миллисекунд до 0,2 с и более.

В настоящее время единственным способом опосредованно определить реальные метрологические характеристики АБГ являются метрологические сличения их результатов измерений g . Кроме того, должна быть оценена инструментальная погрешность измерений УСП g .

Сличения должны проводиться на специально выбранных гравиметрических пунктах в соответствии со специально разработанным техническим протоколом (см. например, [5]).

За два последних десятилетия в мире значительно увеличилось количество АБГ. Среди более ста используемых в настоящее время гравиметров большая часть изготовлена одной компанией. Однако эта компания производит абсолютные гравиметры без сертификатов калибровки.

Новые задачи геодезического сообщества в части абсолютных гравиметрических измерений, стоящие перед Международной Ассоциацией Геодезии (IAG), например задачи Глобальной Геодезической Системы Наблюдений (GGOS), а также возрастающая потребность в точных и достоверных абсолютных гравиметрических измерениях в глобальных и локальных гравиметрических сетях обусловили растущую необходимость создания системы метрологического обеспечения этих измерений.

В настоящее время в области абсолютной гравиметрии в мире еще не полностью создана традиционная система метрологического обеспечения, основанная на иерархической структуре метрологической системы, которая реализует цепочку прослеживаемости единства измерений единиц СИ от первичных эталонов до рабочих инструментов. Стоит отметить, что уже создана система Ключевых Сличений абсолютных гравиметров [4], и она обеспечивает основу для создания международной метрологической системы в абсолютной гравиметрии.

В настоящее время также разрабатывается система калибровки АБГ.

В качестве вклада в создание российского Государственного первичного эталона единицы ускорения в измерении УСП во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии имени Д.И. Менделеева (ВНИИМ) был разработан и изготовлен абсолютный баллистический гравиметр АБГ-ВНИИМ-1.

2. Абсолютный баллистический гравиметр АБГ-ВНИИМ-1

Новый АБГ был создан во ВНИИМ в 2011 г.

В гравиметре АБГ-ВНИИМ-1 используется первичная референтная методика воспроизведения единицы ускорения [4] в гравиметрии (т.е. реализация свободного падения пробного тела; измерение интервалов пути и времени во время свободного падения и оценка ускорения свободного падения (УСП) исходя из уравнения движения свободно падающего пробного тела).

Общее описание гравиметра. Для АБГ-ВНИИМ-1 был разработан оригинальный баллистический блок [6]. Преимуществом данного блока является относительная простота механической системы, с помощью которой осуществляется весь цикл действий от подъема пробного тела в исходное положение для броска, приведение в свободное падение и подхват пробного тела на конечном участке траектории свободного падения, а также отсутствие

магнитных узлов и деталей, которые используются во всех модификациях абсолютных гравиметров типа ГАБЛ (см., например [7, 8]). Пробное тело приводится в состояние свободного падения и находится в падении, при отсутствии движения механических частей баллистического блока и вследствие этого микромеханических возбуждений АБГ с момента начала броска и во время свободного падения пробного тела.

Внутри вакуумной камеры баллистического блока устанавливается двигатель, предназначенный для работы в вакууме, что позволяет избежать использования электромагнитной муфты, которая применяется в обычных моделях АБГ.

Длина пути свободного падения пробного тела составляет примерно 10 см. Референтная высота АБГ-ВНИИМ-1, к которой относится измеренное значение УСП, равна 63 см.

Для АБГ-ВНИИМ-1 был разработан твердотельный Nd:YVO₄/КТР лазер ORVILAS-532-5-S с диодной накачкой, йодно-стабилизированный по частоте на длине волны 532 нм (зеленая область видимого спектра) [9, 10].

Нестабильность частоты лазера, выраженная через дисперсию Аллана, составляет не более $1 \cdot 10^{-10}$ на интервалах времени от 1 мс до 1 с и менее $1 \cdot 10^{-11}$ на интервалах времени 1000 с.

Разработана электроника на базе платформы NI PXI с картой NI 5114 для быстрой регистрации интерференционных полос.

Разработано оригинальное программное обеспечение GROT для управления всеми системами АБГ-ВНИИМ-1 и для вычисления измеряемого значения УСП. Сигнал интерференционной полосы в интерферометре АБГ характеризуется очень быстрым изменением частоты от нескольких килогерц до более чем 5 МГц за менее чем 0,1 с свободного падения пробного тела. Это так называемый chirped сигнал.

Аналоговый ЛЧМ-сигнал от фотоприемника интерферометра и ТТЛ сигнал, полученный из аналогового сигнала, в АБГ-ВНИИМ-1 записываются одновременно. Сигналы интерференционных полос группируются в отсчетные интервалы пути для обработки данных. Количество интерференционных полос в каждом отсчетном интервале пути может предварительно произвольно задаваться в программном обеспечении GROT.

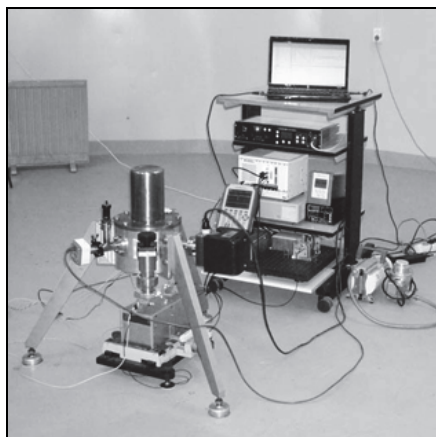


Рис. 1. АБГ-ВНИИМ-1

С помощью программного обеспечения GROT осуществляется сбор данных, их обработка в реальном масштабе времени и постобработка.

Ионный насос используется для создания вакуума после предварительной откачки турбонасосом.

Давление остаточных газов в вакуумной камере находится в пределах от $5 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ Мбар.

Энергопотребление АБГ – примерно 300 Вт.

Общий вид АБГ-ВНИИМ-1 представлен на рис.1.

Лазерная система ORVILAS представлена на рис. 2. Размеры лазерной головки

80×120×160 мм, масса головки примерно 2 кг. Размеры электронного блока 88×240×425 мм, масса – примерно 5 кг.

Для соединения лазера с интерферометром используется одномодовый оптоволоконный кабель.



Рис. 2. Лазерная система Nd:YVO₄/KTP/I₂ ORVILAS на длине волны 532 нм

Поправки, погрешности и испытания гравиметра. Оценка погрешности результатов измерений и поправок к ним с использованием абсолютных баллистических гравиметров описана в ряде докладов (см., например [1, 5]).

Некоторые источники систематических погрешностей и поправок, например поправка на конечную скорость света (см., в частности, [11]) и на гравитационное притяжение самого АБГ [12, 13], изучаются до сих пор.

При оценке погрешностей АБГ-ВНИИМ-1 мы руководствовались документом «Оценка данных измерения – руководство по выражению неопределенности в измерении» (Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (<http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>)).

Поправки, применяемые к результатам измерений УСП гравиметром АБГ-ВНИИМ-1, обусловлены следующими факторами:

- торможение пробного тела вследствие наличия остаточных газов в вакуумной камере,
- взаимодействие падающего пробного тела с гравитационным полем самого АБГ (собственная сила притяжения),
- взаимодействие проводящего пробного тела с градиентом геомагнитного поля и магнитного поля ионного насоса,
- эффекты, связанные с конечностью скорости света,
- эффекты дифракции при распространении лазерного луча в интерферометре,
- гравитационные приливы Земли, океаническая нагрузка и влияние движения полюсов.

Следующие компоненты инструментальной погрешности с их значениями, выраженными в микрогалах ($1 \text{ Гал} = 1 \cdot \text{см} \cdot \text{с}^{-2}$, $1 \text{ мкГал} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ мс}^{-2}$), включены в оценку суммарной инструментальной погрешности:

- погрешность измерения длины волны лазера (0,01 мкГал),
- погрешность вследствие допусков при изготовлении оптических элементов (0,3 мкГал),
- погрешность из-за выбора начального и конечного отсчетного интервала пути (0,7 мкГал),
- погрешность из-за фазовых задержек в электронике (0,5 мкГал),
- погрешность измерения частоты рубидиевого стандарта (0,02 мкГал),

- погрешность измерения УСП из-за притяжения пробного тела самим гравиметром (0,2 мкГал),
- погрешность вычисления поправки за эффект дифракции (0,2 мкГал),
- погрешность измерения референтной высоты (0,2 мкГал),
- погрешность вычисления поправки на взаимодействие пробного тела с градиентом магнитного поля (геомагнитного поля и магнитного поля ионного насоса) (0,1 мкГал),
- погрешность вычисления торможения остаточным газом (0,2 мкГал),
- погрешность юстировки вертикальности лазерного луча (0,3 мкГал),
- погрешность измерения атмосферного давления (0,1 мкГал),
- погрешность оценки поправки за конечную скорость света (0,1 мкГал).

Расширенная инструментальная погрешность оценивалась на уровне 2 мкГал ($2 \cdot 10^{-8} \text{ м с}^{-2}$) с коэффициентом охвата 2.

Важными характеристиками точности АБГ являются невязки в отдельных бросках пробного тела между измеренными интервалами длины и времени и параболической траекторией, полученной методом наименьших квадратов на основании измеренных интервалов длины и времени и уравнения движения пробного тела.

На рис. 3 представлен пример невязок (в нанометрах) в зависимости от времени с начала отсчета интерференционных полос. Невязки в отдельных бросках, усредненные по всем отсчетным интервалам пути в броске, находятся в пределах 0,3 – 0,8 нм.

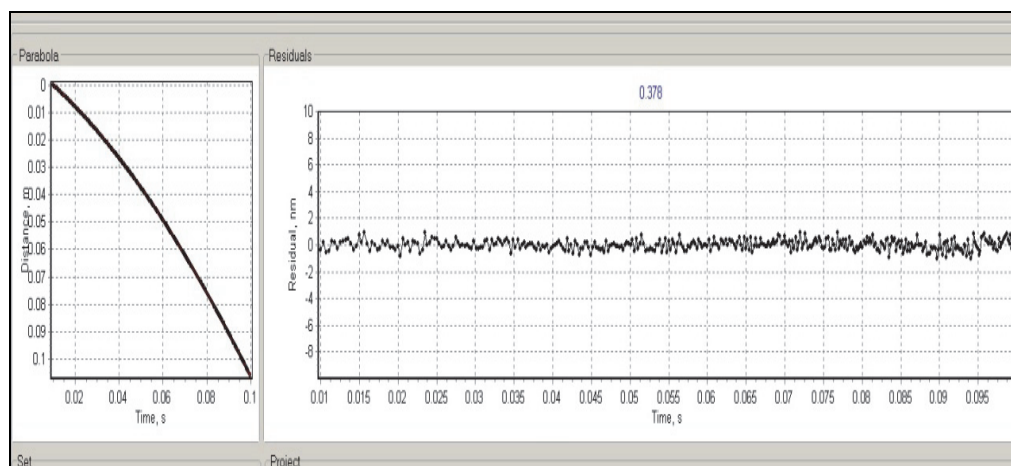


Рис. 3. Пример типичных невязок (справа) и траектории пробного тела (слева) в единичном броске пробного тела в АБГ-ВНИИМ-1

Испытания АБГ-ВНИИМ-1 были проведены на гравиметрическом пункте «Ломоносов-1» в Ломоносовском отделении ВНИИМ (Ломоносов – небольшой город, расположенный в 40 км от Санкт-Петербурга). Гравиметрический пункт располагается на бетонном фундаменте массой 4000 т (размеры 42×13×2,5 м) с собственной частотой 7-8 Гц в месте размещения гравиметрического пункта [11].

Экспериментальное среднеквадратическое отклонение в сериях по 100 бросков в измерениях гравиметром АБГ-ВНИИМ-1 составляет приблизительно 27 мкГал, что сопоставимо с экспериментальным среднеквадратическим

отклонением 21 мкГал в сериях по 100 бросков гравиметра FG5-216, который выполнял измерения на пункте «Ломоносов-1» в 2004 г.

Значение УСП, измеренное гравиметром АБГ-ВНИИМ-1 в ноябре 2011 г. составляет 21 мкГал, что ниже значения УСП, измеренного гравиметром FG5-216 в ноябре 2004 г.

На гравиметрическом пункте «Ломоносов-1» нет криогенного гравиметра для непрерывного мониторинга гравитационного поля, и в настоящее время невозможно объяснить точную причину расхождения между результатами, полученными гравиметром АБГ-ВНИИМ-1 в 2011 г. и гравиметром FG5-216 в 2004 г.

Для подтверждения эксплуатационных и метрологических характеристик АБГ-ВНИИМ-1 планируется участие в сличениях абсолютных гравиметров.

Заключение

Во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева разработан новый абсолютный баллистический гравиметр АБГ-ВНИИМ-1 со свободно падающим пробным телом для лабораторных применений. Новый баллистический блок существенно усовершенствовал конструкцию гравиметра. Стабилизированный по частоте компактный твердотельный лазер с диодной накачкой на длине волны 532 нм обеспечивает мощность лазерного излучения не менее 3 мВт.

Расчетная инструментальная погрешность гравиметра АБГ-ВНИИМ-1 составляет $2 \cdot 10^{-8} \text{ мс}^{-2}$.

В ходе дальнейшего совершенствования предполагается сделать конструкцию более компактной и увеличить ее надежность.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Niebauer T M., Sasagawa G. S., Faller J. E. et al**, A new generation of absolute gravimeters, *Metrologia*, 1995, vol. 32, n. 3, pp 159-180.
2. **Vitushkin L.**, Measurement standards in gravimetry, Gyroscopy and navigation, 2011, vol.2, n 3, pp 184-191.
3. **Vitushkin L.F., Orlov O.A., Germak A., D'Agostino G.**, Laser displacement interferometers with subnanometer resolution in absolute ballistic gravimeters, *Measurement Techniques*, Vol. 55, No. 3, June, 2012, pp 221-228.
4. **International** vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM), JCGM 200:2008.
5. **Jiang Z, V Palinkas, F E Arias, J Liard, S Merlet, H Wilmes, L Vitushkin, L Robertsson, L Tisserand, F Pereira Dos Santos, Q Bodart, R Falk, H Baumann, S Mizushima, J Makinen, M Bilker-Koivula, C Lee, I M Choi, B Karaboce, W Ji, Q Wu, D Ruess, C Ullrich, J Kostecky, D Schmerge, M Eckl, L Timmen, N Le Moigne, R Bayer, T Olszak, J Ågren, C Del Negro, F Greco, M Diamant, S Deroussi, S Bonvalot, J Krynski, M Sekowski, H Hu, L J Wang, S Svitlov, A Germak, O Francis, M Becker, D Inglis, I Robinson**, The 8th International Comparison of Absolute Gravimeters 2009: the first Key Comparison (CCM.G-K1) in the field of absolute gravimetry, *Metrologia*, 2012, vol. 49, n 6, pp 666-684.
6. **Vitushkin L., Orlov O.**, Patent of Russian Federation № 2475786, priority of 6 May 2011.
7. **Arnautov G.P., Gik L.D., Kalish E.N., Koronkevich V.P., Nesterichin Yu. E., Stus Yu. F.** Absolute Laser Gravimeter // *Applied Optics*. 1974. No 2. P. 310-313.
8. **Stus Yu. F., Kalish E.N., Smirnov M. G., Bunin I.A., Nosov D.A.**, Absolute Ballistic Gravimeter for Field Operations, *Proc. of IAG Symposium "Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TGSM-2010)"*, 22-25 June 2010, St Petersburg, Russia, Ed. Concern CSRI ELEKTROPRIBOR, JSC, pp 66-71.

9. **Orlov O., Vitushkin L.**, A compact green laser for absolute ballistic gravimeter, Proceedings of International Symposium "Terrestrial Gravimetry. Static and Mobile Measurements. TGSMM-2010", 22-25 June 2010, St Petersburg, Russia, State Research Center of Russia ELEKTROPRIBOR, 2010, pp 97-102.
10. **Vitushkin L., Orlov O., Nalivaev V.**, Test measurement of free-fall acceleration using the FG5-108 gravimeter with a compact diode-pumped solid-state Nd:YVO₄/KTP/I₂ laser at a wavelength of 532 nm, Proceedings of International Symposium "Terrestrial Gravimetry. Static and Mobile Measurements. TGSMM-2007", 20-23 August 2007, St Petersburg, Russia, State Research Center of Russia ELEKTROPRIBOR, 2008, pp 98-105.
11. **Yankovsky A.A., Krivtsov E.P., Vitushkin L.F., Francis O.**, Investigations of Characteristics of Gravimetric Sites Intended for High-Accuracy Measurements, Proceedings of International Symposium "Terrestrial Gravimetry. Static and Mobile Measurements. TGSMM-2007", 20-23 August 2007, St Petersburg, Russia, State Research Center of Russia ELEKTROPRIBOR, 2008, pp 158-166.

Abstract. A new free-fall absolute ballistic gravimeter ABG-VNIIM-1 was fabricated at the D.I. Mendeleyev Research Institute for Metrology (VNIIM). For this gravimeter we have developed an original mechanical system of ballistic unit, a compact iodine-stabilized in frequency Nd:YVO₄/KTP diode-pumped solid-state laser at the wavelength of 532 nm and the laser interferometer. The path of free fall of the test body in a vacuum chamber is about 10 cm. The electronic system for the fast acquisition of the length and time intervals during the free fall is based on the NI PXI platform. A special software GROT was developed to control of all the systems and to evaluate the measured gravity acceleration. A passive vibration isolation of the reference reflector in the laser interferometer is based on the seismometer. The gravimeter ABG-VNIIM-1 was tested at the gravimetric site "Lomonosov-1" in Lomonosov branch of VNIIM. The estimated total instrumental uncertainty of ABG VNIIM-1 was determined to be $2 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-2}$. The typical residuals in the least square evaluation of the trajectory of the test body in a single drop at the site "Lomonosov-1" are from 0.3 to 0.8 nm.

Key words: free fall acceleration, absolute ballistic gravimeter, interferometer, laser, metrology