

Л. Ф. ВИТУШКИН

АБСОЛЮТНЫЕ БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ГРАВИМЕТРЫ

Принцип действия современных баллистических гравиметров основан на измерении параметров движения макроскопического пробного тела или облака холодных атомов в гравитационном поле и вычислении ускорения свободного падения по измеренным параметрам движения из уравнения движения пробного объекта. Число транспортбельных баллистических гравиметров в мире приближается к двумстам, а погрешность лучших гравиметров приближается к нескольким единицам $10^{-8} \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$. Развивается система метрологического обеспечения абсолютных гравиметров. Совершенствование абсолютных гравиметров позволит, в частности, применять их на подвижном основании.

Ключевые слова: абсолютный баллистический гравиметр, ускорение свободного падения

Введение

Наиболее точными средствами наземных измерений абсолютных значений ускорения свободного падения (ускорения силы тяжести) являются в настоящее время абсолютные баллистические гравиметры (АБГ). В АБГ применяется референтная методика измерений (определение указанной методики дается в [1]) ускорения свободного падения (УСП), в которой реализуется свободное падение пробного тела (ПТ) в гравитационном поле в локальной системе отсчета, находящейся на вращающейся Земле. В качестве ПТ служит или макроскопическое тело со встроенным оптическим отражателем, или облако охлажденных атомов.

Витушкин Леонид Фёдорович. Доктор технических наук, начальник лаборатории ВНИИ метрологии им. Д.И.Менделеева (ВНИИМ), Университет ИТМО (С.-Петербург).

Статья по докладу на XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2015.

В первом случае интервалы пути и интервалы времени падения макроскопического ПТ измеряются соответственно лазерным интерферометром перемещений и системой измерения интервалов времени. По измеренным интервалам пути и времени из известного уравнения движения ПТ, свободно движущегося в гравитационном поле, вычисляется значение УСП.

Во втором случае атомы, движение которых управляется лазером, образуют интерферометры волн материи (атомные интерферометры) и измерение фазовых сдвигов этих волн материи, обусловленных движением в гравитационном поле, дает значение УСП (см., например, [2–5]).

Слово «баллистический» в термине «абсолютный баллистический гравиметр» означает, что пробное тело в абсолютном гравиметре движется по баллистической траектории.

Относительная погрешность измерения УСП современными АБГ достигает нескольких единиц 10^{-9} м·с⁻². В абсолютных величинах для земных значений УСП это составляет несколько единиц 10^{-8} м·с⁻² или несколько микрогал (широко используемая внесистемная единица ускорения 1 Гал = 1 см·с⁻²).

Областями применения наземной абсолютной гравиметрии являются науки о Земле – геодезия и геофизика, геология, геологоразведка, техническая геология, глобальные модели гравитационного поля Земли для глобальных навигационных спутниковых систем, военное дело, гравиметрическое сопровождение навигационных систем, научные исследования, связанные с необходимостью учета влияния гравитационного поля, метрология. Одним из важных применений абсолютной гравиметрии в метрологии в настоящее время являются измерения УСП в ходе экспериментов по измерению постоянной Планка и реализации ожидаемого нового определения единицы массы – килограмма – с помощью ватт-весов или джоуль-весов [6].

Целевая погрешность абсолютных измерений УСП в одном из важнейших проектов Международной ассоциации геодезии (МАГ) по глобальной системе геодезических наблюдений GGOS (Global Geodetic Observing System – см., в частности, [7]) определена величиной 1 мкГал.

В настоящее время в мире для абсолютных измерений УСП используется не менее 150 АБГ с макроскопическим ПТ. Большинство их этих гравиметров являются коммерческими, изготовленными одной фирмой в США. Ряд гравиметров разрабатывался и разрабатывается университетами, национальными метрологическими институтами (НМИ) и коммерческими фирмами. Эти гравиметры представляют собой в основном экспериментальные образцы. Ведутся и разработки гравиметров на холодных атомах (см., например, [2–5] и <http://www.muquans.com/>). Далее мы рассмотрим более детально АБГ на макроскопическом ПТ.

В заключение этого раздела отметим несколько статей [8–11] обзорного плана, излагающих некоторые аспекты истории развития техники для абсолютных баллистических измерений УСП.

Общая структура абсолютных баллистических гравиметров

При требуемой относительной погрешности измерения УСП абсолютным гравиметром порядка $1 \cdot 10^{-9}$ м·с⁻² системы АБГ должны обеспечивать измерение интервалов пути с такой же относительной погрешностью, а измерение интервалов времени – с относительной погрешностью не более $5 \cdot 10^{-10}$ м·с⁻². Такие

требования при системном подходе к конструированию гравиметра должны учитываться при разработке всех его составных частей.

В состав АБГ с макроскопическим ПТ входят, как правило:

- баллистический блок для реализации свободного падения ПТ;
- вакуумная камера для размещения баллистического блока;
- опорный стол для установки и юстировки положения вакуумной камеры с баллистическим блоком;
- лазерный интерферометр перемещений для измерения интервалов пути свободного движения ПТ;
- система пассивной или активной виброизолирующей подвески оптического отражателя опорного плеча лазерного интерферометра перемещений;
- стабилизированный по частоте лазер лазерного интерферометра;
- система измерения интервалов времени прохождения пробным телом соответствующих интервалов пути;
- компьютер с программным обеспечением для управления системами АБГ, вычисления измеренного значения УСП по измеренным интервалам пути и времени из уравнения движения свободного падающего ПТ и вычисления геофизических (например, на гравитационные приливы) и других (в частности, на собственное гравитационное притяжение гравиметра, на конечную скорость света) поправок.
- вспомогательное оборудование, содержащее систему вакуумирования вакуумной камеры.

Технические реализации перечисленных систем у существующих АБГ различны. Опишем некоторые из них.

Баллистические блоки

Баллистический блок АБГ представляет собой электромеханическую систему для реализации всех циклов движения ПТ, включая его свободное падение внутри вакуумной камеры и установку ПТ в исходном начальном положении для броска.

В современных АБГ используется один из двух видов свободного движения – подбрасывание ПТ вертикально вверх и его движение по симметричной траектории вверх и вниз (rise-and-fall gravimeters) или свободное падение ПТ из исходного положения (free fall gravimeters).

Гравиметры с симметричной траекторией движения ПТ разрабатывались в целях парирования влияния на движение ПТ сопротивления остаточного газа в вакуумной камере, так как это влияние исключается или значительно снижается на симметричной траектории. В настоящее время разработками гравиметров с симметричной траекторией занимается НМИ Италии INRIM (бывший IMGC) [13].

В ходе технических разработок по мере уменьшения задаваемой длины пути свободного падения ПТ, что было связано с совершенствованием лазерных интерферометров перемещений и лазеров и совершенствованием вакуумной техники, произошел переход к схеме гравиметров с несимметричной траекторией. Баллистический блок таких гравиметров обладал еще и тем преимуществом, что не нуждался в системе подавления ударного возбуждения, возникающего

после срабатывания катапульты, подбрасывающей ПТ в гравиметрах с симметричной траекторией.

Существуют различные конструкции баллистических блоков АБГ с несимметричной траекторией. В наиболее распространенных гравиметрах типа FG5 фирмы Micro-g LaCoste, Ltd (США) ПТ перед броском установлено в верхней точке траектории на каретке, которая в начальный момент движется с ускорением, направленным вертикально вниз, так, чтобы ПТ оторвалось от каретки и начало свободно падать. В процессе свободного падения ПТ каретка, управляемая специальной системой, движется на небольшом расстоянии перед ПТ и в конце заданного пути (около 21 см) плавно замедляется, чтобы мягко подхватить ПТ [12,14]. Недостатком такой конструкции является постоянное движение каретки в баллистическом блоке в процессе свободного падения ПТ, что приводит к возбуждению механических микровибраций всего баллистического блока гравиметра. Даже введение механически сбалансированной конструкции последней модели гравиметра FG5X не позволило полностью исключить возбуждение микровибраций. Полный цикл выполнения единичного броска ПТ в гравиметрах типа FG5 составляет не более 10 с.

В различных модификациях гравиметров типа ГАБЛ разработки Института автоматики и электрометрии (ИАЭ) Сибирского отделения Российской академии наук ПТ со встроенным элементом из магнитно-мягкого материала сначала удерживается в верхней начальной точке траектории системой электромагнитов, а затем при выключении тока начинает падать [15]. Недостатком такой конструкции является наличие остаточного магнитного поля электромагнита, не исчезающего мгновенно после выключения электромагнита, и наличие остаточного магнитного поля в магнитно-мягком материале элемента на ПТ, что приводит к тому, что в начале траектории ПТ движется не свободно, а взаимодействует с остаточным полем электромагнита и с геомагнитным полем.

Указанные выше недостатки удалось исключить или значительно снизить в конструкции баллистического блока гравиметра АБГ-ВНИИМ-1 разработки ВНИИ метрологии им. Д.И.Менделеева [16,17]. В этом баллистическом блоке ПТ с укрепленным на его вершине вертикальным тонким стержнем удерживается в начальном верхнем положении траектории падения специальным захватом стержня. Захват на основе пьезоэлемента высвобождает ПТ без возбуждения микровибраций, и ПТ свободно падает. Внизу ПТ подхватывается специальной ловушкой, и каретка снова поднимает ПТ в исходное верхнее положение. Длина пути падения ПТ в гравиметре АБГ-ВНИИМ-1 около 10 см. Полный цикл выполнения единичного броска ПТ в этом гравиметре составляет не более 10 с.

Необходимо отметить конструкцию гравиметра с эксцентриковым баллистическим блоком, обеспечивающим 200 единичных бросков в минуту при длине пути свободного падения около 2 см [18].

Лазеры и лазерные интерферометры перемещений

Другой важной системой любого АБГ является лазерный интерферометр перемещений для измерения интервалов пути свободного падения ПТ с относительной погрешностью $1 \cdot 10^{-9}$ м·с⁻². Таким образом, для длины пути около 20 см (гравиметры типа FG5) абсолютная погрешность не должна превышать 0.2 нм, а для эксцентрикового гравиметра – 0.02 нм.

Эта задача представляется достаточно сложной и фактически лежит в области субнанометрологии. Ситуация несколько упрощается тем, что в интерферометрах АБГ идет счет только целого числа интерференционных полос.

В существующих АБГ используются преимущественно двухлучевые лазерные интерферометры (см., например, [11,12,15,19,20]) с оптической схемой типа интерферометра Майкельсона или типа интерферометра Жамена. Известен также пример реализации в АБГ оптической схемы интерферометра Фабри – Перо [21].

В качестве лазеров для лазерных интерферометров перемещений, входящих в состав АБГ, используются в основном стабилизированные по частоте He-Ne-лазеры на длине волны 633 нм (красная область видимого спектра) (см., например, [12]) и твердотельные лазеры с лазерно-диодной накачкой на длине волны 532 нм (зеленая часть видимого спектра) (см., например, [16]).

Твердотельный лазер на длине волны 532 нм обладает большей мощностью излучения, более короткой длиной волны излучения и меньшим уровнем частотных шумов по сравнению с газовым He-Ne-лазером.

Системы виброизоляции опорного отражателя интерферометра

Опорный отражатель интерферометра должен реализовать начало квазиинерциальной системы отсчета, по отношению к которой ведется измерение интервалов пути, пройденного свободно падающим ПТ. Опорный отражатель должен быть стабилен в пространстве, что достигается использованием пассивных или активных систем виброизоляции этого отражателя.

Во всех АБГ фирмы Micro-g LaCoste, Ltd используется система активной виброизоляции отражателя [12, 14]. Эти системы используют и некоторые разработки других гравиметров. В ряде других гравиметров используются системы пассивной виброизоляции – обычно длиннопериодные сейсмометры.

Системы регистрации интервалов пути и времени

Используются различные системы регистрации, основанные на применении высокоскоростных АЦП. Применяются, в частности, двухканальные АЦП NI 5112 и NI 5114 [16,22].

Оценим на примере гравиметра АБГ-ВНИИМ-1 [16] число интерференционных полос (ИП), регистрируемых при свободном падении ПТ на пути 10 см, и частоту их счета на длине волны излучения лазера 532 нм. За время падения около 0.14 с частота счета меняется практически от нуля в начале падения до более чем 5 МГц в конце пути, а число регистрируемых полос превышает 360 тысяч. Обычно отсчет ИП ведется группами (например, по 1000 ИП). Таким образом, в единичном броске ПТ в гравиметре АБГ-ВНИИМ-1 должно регистрироваться около 360 групп ИП (отсчетных интервалов пути) и соответствующих интервалов времени.

Метрологические характеристики и сличения абсолютных гравиметров

При оценивании систематической инструментальной погрешности АБГ с макроскопическим ПТ надлежит учитывать следующие составляющие погрешности (см., например, [12,16]):

- измерения длины волны лазера;
- измерения частоты рубидиевого стандарта;
- вычисления поправки на торможение ПТ остаточным газом в вакуумной камере;
- измерения референтной высоты над постаментом гравиметрического пункта, к которой относится измеренное значение УСП;
- вычисления дифракционной поправки;
- вычисления поправки на собственное гравитационное притяжение пробного тела самим абсолютным гравиметром;
- вычисления поправки на взаимодействие падающего ПТ с неоднородным магнитным полем;
- юстировки вертикальности лазерного луча;
- вычисления поправки на атмосферное давление;
- вычисления поправки на конечную скорость света;
- на неточность изготовления оптических элементов;
- за счет выбора начального и конечного отсчетного интервала пути;
- за счет фазовых задержек в системе детектирования и регистрации интерференционных полос.

Суммарная инструментальная погрешность гравиметра АБГ-ВНИИМ-1 составляет 2 мкГал. Заявленная суммарная инструментальная погрешность коммерческого АБГ FG5 также 2 мкГал.

Случайная составляющая погрешности измерений УСП абсолютными гравиметрами зависит от микросейсмической обстановки на гравиметрическом пункте.

АБГ измеряет ускорение свободного падения. Ускорение является производной единицей, и, следовательно, АБГ должен быть калиброван в единицах длины и времени.

Обычно выполняется калибровка частоты лазера и частоты опорного генератора системы измерения интервалов времени (обычно рубидиевого генератора частоты или приемника GPS или ГЛОНАСС). Это необходимо, но недостаточно для калибровки гравиметра [23]. Следует иметь в виду, что лазер не реализует единицу длины и его калибровка по частоте (длине волны) не обеспечивает калибровку лазерного интерферометра гравиметра в единицах длины. Единицу длины реализует лазерный интерферометр перемещений.

Калибровка опорного рубидиевого генератора частоты производится на интервалах времени в десятки минут, что не обеспечивает подтверждения необходимых метрологических характеристик системы измерения интервалов времени на интервалах порядка десятых секунды, т.е. на временах свободного падения ПТ в единичном броске.

Для определения метрологических характеристик АБГ организуются сличения результатов их измерений ускорения свободного падения, проводимые на одном гравиметрическом пункте по согласованным техническим протоколам, определяющим программу измерений, метод вычисления результатов сличений и процедуру их представления.

Первые международные сличения результатов измерений УСП пятью абсолютными гравиметрами были проведены в 1981 году в Международном Бюро Мер и Весов – МБМВ (г. Севр, Франция). В период до 2009 г. МБМВ и МАГ

организовали в МБМВ восемь международных сличений. В дальнейшем международные сличения стали организовываться и в других странах (Люксембург, США, Китай). В настоящее время сличения гравиметров организовываются по правилам метрологического сообщества, определенным Международным Соглашением о взаимном признании результатов измерений и сертификатов калибровки (Mutual Recognition Arrangement - см. документы, включая руководство по организации сличений, на вебсайте МБМВ <http://www.bipm.org/en/cipm-mra/cipm-mra-documents/>).

Метрологические сличения абсолютных гравиметров (ключевые сличения) являются средством установления эквивалентности национальных эталонов. Абсолютные гравиметры, признанные национальными первичными эталонами в гравиметрии, – это эталоны единицы ускорения в области измерения ускорения свободного падения.

Принятая метрологическим и геодезическим сообществами «Стратегия консультативного комитета по массе и связанным величинам (ККМ) и МАГ в области метрологии в абсолютной гравиметрии» предлагает внедрение в абсолютную гравиметрию традиционной метрологической иерархической структуры. Эта структура основана на первичном эталоне и подчиненных вторичных и рабочих эталонах и рабочих средствах измерений – абсолютных гравиметрах, которые должны калиброваться с помощью эталонов.

Следует отметить, что абсолютный баллистический гравиметр АБГ-ВНИИМ-1 входит в состав Государственного первичного специального эталона ГЭТ 190-2011 единицы ускорения в области гравиметрии [16]. В этом эталоне АБГ является средством воспроизведения единицы ускорения в гравиметрии (в области измерения ускорения свободного падения), а передача единицы (калибровка) производится на гравиметрическом пункте «Ломоносов-1» в Ломоносовском отделении ВНИИМ.

Результаты ключевых сличений абсолютных гравиметров - национальных эталонов представляются в базе данных ключевых сличений (Key Comparison Data Base -Kcdb) МБМВ (см. на <http://kcdb.bipm.org/>, где в строке «search comparisons» следует ввести «free fall acceleration»).

На рис. 1 и 2 приведены результаты ключевых сличений абсолютных гравиметров 2009 и 2013 гг. На этих рисунках по горизонтальной оси представлены наименования НМИ, участвовавших в сличениях/наименование абсолютного гравиметра. На вертикальной оси указаны значения отклонения в микрогалах результата каждого из участвовавших гравиметров от опорного значения ключевых сличений (key comparison reference value – KCRV) – значения УСП, вычисленного по результатам измерений всех гравиметров, выполненных на гравиметрическом пункте во время сличений. В частности, в сличениях 2009 года 11 АБГ выполнили 96 двенадцатичасовых серий измерений на пяти гравиметрических станциях гравиметрического пункта МБМВ [24]. Вертикальные отрезки на этих рисунках, исходящие из точки, представляющей результат измерений, обозначены суммарные погрешности измерений каждого гравиметра на уровне достоверности 95%.

Кроме того, на рис. 1 и 2 показаны и результаты измерений гравиметра на холодных атомах CAG-01 национального института метрологии Франции LNE-SYRTE. Представленные результаты сличений отражают реальные погрешности лучших современных АБГ.

Необходимо отметить, что при определении опорных значений ключевых сличений, т. е. измеренных значений УСП на гравиметрических пунктах, где проводятся сличения гравиметров, достигается погрешность порядка 1 мкГал.

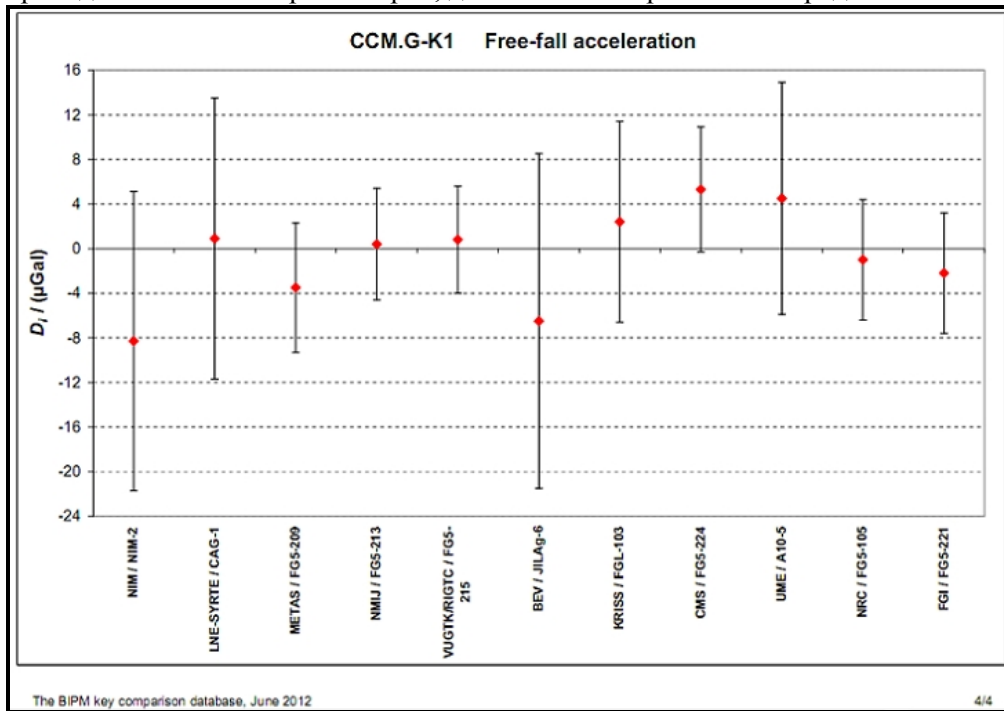


Рис. 1. Результаты ключевых сличений абсолютных гравиметров CCM.G-K1 (2009 г., МБМВ, г.Севр, Франция)

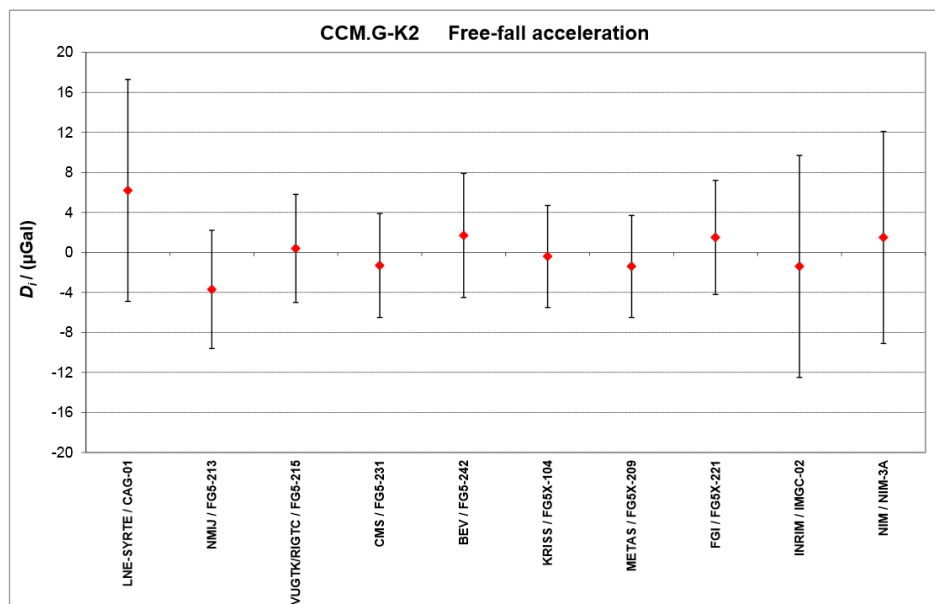


Рис. 2. Результаты ключевых сличений абсолютных гравиметров CCM.G-K2 (2013 г., г. Вальферданж, Люксембург) [25]

Расширение сети гравиметрических пунктов для проведения международных ключевых сличений на все континенты (сейчас они уже организованы и продолжают организовываться в Европе, Азии и Северной Америке) в сочетании с постоянным мониторингом временных вариаций гравитационного поля на этих пунктах с помощью криогенных гравиметров с разрешением порядка десятков наногал открывает возможность образования новой глобальной сети абсолютных гравиметрических пунктов с погрешностью определения УСП на пунктах, не превышающей 10 мкГал, что на порядок меньше, чем на пунктах существующей международной гравиметрической сети IGSN-71 [26].

Заключение

В последние десятилетия значительно выросло (в основном за рубежом) число транспортабельных абсолютных гравиметров и погрешность измерений УСП лучшими гравиметрами уменьшилась до нескольких микрогал. Это открыло возможность выполнения значительного числа высокоточных измерений УСП не только для единичных определений УСП на отдельных пунктах фундаментальных гравиметрических сетей, но и для достаточно частых повторных измерений и наблюдений временных вариаций гравитационного поля.

Безусловным преимуществом абсолютных гравиметров является практическое отсутствие «дрейфа нуля» (высокая повторяемость и воспроизводимость результатов измерений). Развиваются система метрологического обеспечения абсолютных гравиметров, основанная на национальных первичных эталонах единицы ускорения в области гравиметрии (абсолютных гравиметрах) и на системе калибровок рабочих абсолютных гравиметров, а также организация их ключевых сличений.

Открыта возможность формирования новой глобальной системы опорных абсолютных гравиметрических пунктов с определением на них значений УСП с погрешностью, по крайней мере на порядок меньшей, чем в ныне существующей международной сети гравиметрических пунктов IGSN-71.

Оба вида абсолютных гравиметров – АБГ на макроскопических пробных телах и АБГ на холодных атомах – постоянно совершенствуются и найдут свои области применения. Имеются перспективы их значительного совершенствования в части уменьшения габаритов и массы, надежности и воспроизводимости результатов.

Полученные в настоящее время характеристики АБГ и указанные перспективы их совершенствования позволяют надеяться на разработку абсолютных гравиметров для измерений на подвижном основании в аэро- и морской гравиметрии.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда
(проект №14-29-00160).*

ЛИТЕРАТУРА

1. **VIM - International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms**, JCGM, 2008 (see also: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html>)
2. **Bordé Ch.J.** Atomic clocks and inertial sensors, *Metrologia*, 2002, vol. 39, n. 35, pp. 435-463.
3. **Peters, A., Chung, K.Y., Chu, S.**, 2001, High-precision gravity measurements using atom interferometry, *Metrologia*, vol. 38, 25-61.
4. **Merlet S., Gouët J.Le, Bodart Q., Clairon A., Landragin A., Pereira F.Dos Santos, Rouchon P.**, Operating an atom interferometer beyond its linear range, *Metrologia*, 2009, vol. 46, n. 1, pp 87-94.

5. **De Angelis M., Bertoldi A., Cacciapuoti L., Giorgini A., Lamporesi G., Prevedelli M., Saccorotti G., Sorrentino F., Tino G.M.** Precision gravimetry with atomic sensors, *Meas.Sci.Technol*, 2009, vol. 20, n 2, 022001.
6. **Jiang Z., Pálinkáš V., Francis O., Baumann H., Mäkinen J., Vitushkin L., Merlet S., Tisserand L., Jousset P., Rothleitner C., Becker M., Robertsson L., Arias E.F.** On the gravimetric contribution to watt balance experiments, *Metrologia*, vol. 50, 2013, n. 5, pp 452-471.
7. **Global Geodetic Observing System, Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020**, Hans-Peter Plag, Michael Pearlman, Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA, USA (Eds.), Springer, 2009, 332 p.
8. **Cook A.H.** The absolute determination of the acceleration due to gravity, *METROLOGIA*, 1965, vol. 1, n. 3, pp 84-114.
9. **Crossley D., Hinderer J., Riccardi U.** The measurement of surface gravity, *Reports on Progress in Physics*, 2013, vol. 76, 046101, pp 1-47.
10. **Timmen L.** Absolute and relative gravimetry, in G.Xu (ed.), *Sciences of Geodesy - I*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010, pp 1-48.
11. **Faller J.E.** The measurement of little g: a fertile ground for precision measurement science, *J.of Research of the NIST*, 2005, vol. 110, n. 6, pp 559-581.
12. **Niebauer T.M., Sasagawa G.S., Faller J.E., Hilt R., Klopping F.** A new generation of absolute gravimeters, *Metrologia*, 1995, vol. 32, n 3, pp 159-180.
13. **Germak A., Desogus S., Origlia C.** Interferometer for the IMGC rise-and-fall gravimeter, *Metrologia*, 2002, vol. 39, n.5, pp 471-475.
14. **Niebauer T.V., Hollander W.J., Faller J.E.** Absolute gravity inline measuring apparatus incorporating improved operating features, USA Patent № 5351122, date of patent Sep.27, 1994.
15. **Арнаутов Г.П., Калиш Е.Н., Смирнов М.Г., Стусь Ю.Ф., Тарасюк В.Г.** Баллистический гравиметр, Авторское свидетельство СССР SU 1563432, G 01 V 7/14, 1 августа 1988 г.
16. **Витушкин Л.Ф., Орлов О.А.** Абсолютный баллистический гравиметр АБГ ВНИИМ-1 разработки ВНИИМ имени Д.И.Менделеева, Гироскопия и навигация. 2014, №. 2, с. 95-101.
17. **Витушкин Л.Ф., Орлов О.А.** Абсолютный баллистический гравиметр, Патент на изобретение № 2475786 с приоритетом от 06 мая 2011 г.
18. **Vitouchkine A.L., Faller J.E.** Measurement results with a small cam-driven absolute gravimeter, *Metrologia*, 2002, vol. 39, n 2, p. 465-469.
19. **Faller J., Niebauer T., Vitouchkine A.** Rotary cam driven free fall dropping chamber mechanism, Patent USA № 6298722, date of patent: Oct. 9, 2001.
20. **Germak A., Desogus S., Origlia C.** Interferometer for the IMGC rise-and-fall absolute gravimeter, *Metrologia*, vol.39, n 5, pp 471-475.
21. **Canuteson E.L., Zumberge M.A.** Fiber-optic extrinsic Fabry-Perot vibration-isolated interferometer for use in absolute gravity meters, *Applied Optics*, 1996, vol. 35, n. 19, pp 3500-3505.
22. **D'Agostino G., Germak A., Desogus S., Origlia C., Barbato G.** A method to estimate the time-position coordinates of a free-falling test-mass in absolute gravimetry, *Metrologia*, 2005, vol.42, n.4, pp 233-238.
23. **Vitushkin L.F.** Measurement standards in gravimetry, *Gyroscopy and Navigation*, 2011, vol. 2, n 3, pp 184-191.
24. **Jiang Z., Pálinkáš V., Arias F.E., Liard J., et al.** 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.
25. **Francis O., Baumann H., Ullrich Ch., Castelein S., et al.** CCM.G-K2 key comparison, *Metrologia*, 2015, Technical Supplement, 07009.
26. **Crossley D., Vitushkin L.F., Wilmes H.** Global reference system for determination of the Earth gravity field: from Potsdam system to the Global Geodynamics Project and further to the international system of fundamental absolute gravity stations, *Труды Института Прикладной Астрономии РАН*, выпуск 27, 2013/ -СПб., с. 333-338.

Abstract. Operating principle of modern ballistic gravimeters is based on the measurement of motion parameters of a macroscopic test body or a cloud of cold atoms in the field and calculation of free-fall using the measured motion parameters from the test body motion equation. There are about 200 transportable ballistic gravimeters in the world, the best of which feature uncertainty of a few units of 10^{-8} ms^{-2} . Metrological assurance system for absolute gravimeters is being developed. Improvements in absolute gravimeters will allow their use on moving platforms.

Key words: absolute ballistic gravimeter, acceleration of gravity