

Государственный первичный специальный эталон ускорения для гравиметрии ГЭТ 190-2019

Л. Ф. Витушкин, Ф. Ф. Карпешин, Е. П. Кривцов, П. П. Кролицкий,
В. В. Наливаев, О. А. Орлов, М. М. Халеев

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: eluar@mail.ru, fkarpeshin@gmail.com, e.p.krivotsov@vniim.ru, pash1434@yandex.ru, nvlad2@yandex.ru, oorl@mail.ru, mmhal@mail.ru

Приведены состав, принцип работы и основные метрологические характеристики Государственного первичного специального эталона ускорения для гравиметрии ГЭТ 190-2019. Эталон является верхним звеном эталонной базы для измерений ускорения свободного падения. Точность и надёжность ГЭТ 190-2019 повышены в результате оптимизации методик юстировки измерительных систем и включения в его состав усовершенствованных систем, узлов и современной элементной базы. Особое внимание уделено уточнению вводимых в результаты измерений поправок, обусловленных методическими, физическими и техническими ограничениями. Применённые методы исследований позволили подтвердить диапазон ГЭТ 190-2019, а также определить вклады основных источников и суммарное значение погрешности. Метрологические характеристики ГЭТ 190-2019 подтверждены результатами измерений абсолютного значения ускорения свободного падения на гравиметрическом пункте «Ломоносов-1» и их сравнением с данными, полученными в различное время с помощью высокоточных зарубежных и отечественных гравиметров.

Актуальность работ определяют требования прикладных задач, для решения которых необходимы данные о параметрах гравитационного поля Земли. Геофизика и навигация являются основными областями применения высокоточных измерений в этой области.

Ключевые слова: гравиметрия, ускорение свободного падения, геоид, гравиметрический пункт, абсолютный баллистический гравиметр.

Введение. Результаты высокоточных измерений параметров гравитационного поля Земли и его изменений находят широкое применение как при фундаментальных исследованиях (уточнение модели геоида, изучение внутреннего строения Земли), так и для решения прикладных задач (разведка полезных ископаемых, глобальное позиционирование и навигация, прогноз геодинамической активности) [1].

Государственный первичный специальный эталон единицы ускорения для гравиметрии ГЭТ 190-2019 – основа метрологического обеспечения этой области в Российской Федерации.

Первые измерения ускорения свободного падения (УСП) с помощью абсолютного баллистического гравиметра (АБГ) на гравиметрическом пункте ВНИИМ выполнены в 2004 г. в рамках научно-технического сотрудничества с Европейским центром геодинамики и сейсмологии (Люксембург). В этих исследованиях применяли участвовавший в международных сличениях баллистический гравиметр FG5 Европейского центра. Гравиметрический пункт ВНИИМ находится в Ломоносовском отделении института в пригородной зоне Санкт-Петербурга в специализированном здании с виброизолирующим фундаментом массой около 4 000 т. Площадь пункта составляет более 60 м²,

на которых находятся 7 гравиметрических станций. Это позволяет размещать оборудование для сличений нескольких гравиметров.

До 2010 г. проводились предварительная проработка основных систем АБГ, а также оснащение и исследование гравиметрического пункта. Определённым этапом работ стало утверждение Государственного первичного специального эталона единицы ускорения для гравиметрии ГЭТ 190-2011, который включал гравиметрический пункт и АБГ, разработанный на основе оригинальных технических решений [2].

В 2019 г. проведены работы по совершенствованию ГЭТ 190-2011, которые в первую очередь были связаны с модернизацией входящего в его состав АБГ.

Актуальность совершенствования ГЭТ 190-2011 обусловили следующие факторы:

необходимость опережающего развития эталонной базы в связи с развитием средств измерений (СИ) и методов их калибровки: появились новые высокоточные СИ параметров гравитационного поля, в измерительную практику вошли абсолютные гравиметры, продолжается разработка абсолютных гравиметров на основе новых физических принципов (атомных гравиметров) [3], постоянно улучшаются характеристики дрейфа относительных гравиметров;

формирование круга прикладных задач, требующих дальнейшего повышения точности измерений, в отдельных случаях на уровне первичного эталона [4];

развитие инструментального парка гравиметрии изменило соотношение объёмов абсолютной и относительной гравиметрии [5] и сделало экономически целесообразным комплексное использование этих методов;

актуальность международной интеграции, условием которой является уровень метрологического обеспечения;

моральное и физическое старение отдельных узлов и систем ГЭТ 190-2011;

повышение уровня внешних сейсмогравитационных техногенных помех в месте расположения ГЭТ 190-2011.

В результате исследований, проводимых в рамках постоянных метрологических работ с момента утверждения ГЭТ 190-2011, подтверждена возможность повышения точности эталона и показаны пути решения поставленных задач.

Состав ГЭТ 190-2019. Основные направления работ по совершенствованию АБГ:

оптимизация работы механических узлов и систем, в первую очередь электромеханической системы, в части улучшения качества броска пробного тела;

применение элементов, обеспечивающих более высокие технические и метрологические характеристики: замена опорного лазера на модель с функцией перезахвата частоты излучения [6], использование фотоприёмного устройства с расширенным частотным диапазоном;

исследования по уточнению вводимых в результаты измерений поправок для исключения систематических составляющих;

совершенствование системы виброизоляции входящего в состав АБГ лазерного интерферометра;

оптимизация методик юстировки измерительных систем, обновление программного обеспечения, а также повышение надёжности и увеличение ресурса механических узлов.

В 2019 г. после завершения указанных работ и проведения необходимых исследований ГЭТ 190-2011 был перепроверен как Государственный первичный специальный эталон ускорения для гравиметрии ГЭТ 190-2019.

Метрологические характеристики ГЭТ 190-2019	
Диапазон воспроизведения УСП.....	9,77–9,85 м·с ⁻²
Номинальное значение воспроизведения УСП.....	9,82 м·с ⁻²
СКО результата измерений при воспроизведении единицы	
(не менее 20 серий по 100 независимых измерений в каждой).....	
НСП.....	не более 2·10 ⁻⁸ м·с ⁻² (2 мкГал)
НСП.....	не более 1,8·10 ⁻⁸ м·с ⁻² (1,8 мкГал)
Стандартная неопределённость	
по типу А U _A	2·10 ⁻⁸ м·с ⁻² (2 мкГал)
по типу В U _B	0,8·10 ⁻⁸ м·с ⁻² (0,8 мкГал)
суммарная.....	2,1·10 ⁻⁸ м·с ⁻² (2,1 мкГал)
Расширенная неопределённость	
(при k=2).....	4,2·10 ⁻⁸ м·с ⁻² (4,2 мкГал)
Межаттестационный интервал	1 год

Состав ГЭТ 190-2019:

АБГ АБГ-ВНИИМ-2, обеспечивающий воспроизведение единицы ускорения;

гравиметрический пункт «Ломоносов-1» для хранения и передачи единицы ускорения;

вспомогательное оборудование для обеспечения и контроля необходимого вакуума в измерительной камере гравиметра и контроля параметров окружающей среды.

Анализ результатов. Воспроизведение единицы ускорения с помощью ГЭТ 190-2019 основано на методе измерения УСП по параметрам движения пробного тела в вакууме. Современная реализация этого метода измерений предусматривает использование уравнения, определяющего высоты z_i и соответствующие моменты времени t_i точек траектории пробного тела, падающего в гравитационном поле $g(z)=g_0+\gamma z$ с учётом вертикального градиента γ :

$$z_i = z_0 + V_0 t_i + \frac{g_0 t_i^2}{2} + \gamma \left(\frac{V_0 t_i^3}{6} + \frac{g_0 t_i^4}{24} \right), \quad (1)$$

где g_0 – ускорение свободного падения в начальной точке траектории пробного тела; z_0 , V_0 – соответственно высота и скорость пробного тела в начальный момент времени t_0 .

Уравнение (1) используется для аппроксимации результатов измерений (массива данных $t_i(z_i)$ для каждого броска пробного тела) и вычисления УСП в месте проведения измерений с учётом поправок, обусловленных геофизическими факторами, условиями проведения измерений, физическими и техническими ограничениями.

Значения, полученные в соответствии с (1), включают как постоянное УСП, так и переменные составляющие, обусловленные природными процессами. Для определения УСП переменные составляющие должны быть исключены. Явления глобального масштаба (лунно-солнечные приливы, океаническая нагрузка и прецессия полюсов Земли) учитываются по данным соответствующих международных геофизических служб, являются общепризнанными в гравиметрии и не учитываются как источники неисключённой систематической погрешности (НСП).

К числу переменных составляющих ускорения, регистрируемых АБГ, относятся неприливные вариации, основным источником которых является изменение уровня грунтовых вод в месте расположения гравиметрического пункта. Диапазон периодов таких вариаций составляет от нескольких часов до месяцев, и при измерениях с применением АБГ вариации интерпретируются как изменение постоянного значения УСП на пункте измерения. Контроль уровня грунтовых вод с помощью гидрологических скважин не позволяет рассчитать поправки на уровне точности порядка 1 мкГал, но вариации УСП, вызываемые этим источником и другими причинами, регистрируются относительными гравиметрами, имеющими необходимую точность и характеристики дрейфа. Практически единственным типом таких приборов в настоящее время можно считать криогенные относительные гравиметры [7]. Неприливные вариации обусловлены природными явлениями и характеризуют

способность гравиметрического пункта сохранять опорное значение УСП, но не являются источником погрешности измерений УСП баллистическим гравиметром. Естественно, при калибровке и поверке гравиметрической аппаратуры с использованием опорного значения УСП гравиметрического пункта неприливые вариации необходимо учитывать как погрешность передачи единицы. Эта погрешность уменьшается при уточнении опорного значения с использованием эталонного АБГ или криогенного относительного гравиметра.

Локальные баровариации учитываются с использованием барометрического фактора (0,3 мкГал/гПа), вызывающего изменения атмосферного давления и УСП. При этом измеренное значение УСП приводится к нормальному атмосферному давлению на заданной высоте и погрешность измерения атмосферного давления в месте расположения АБГ рассматривается как источник составляющей НСП. Использование на гравиметрическом пункте «Ломоносов-1» прецизионного цифрового барометра БОП-1М позволило уменьшить эту составляющую до 0,1 мкГал.

НСП ГЭТ 190-2019 на основе АБГ формируется как результат составляющих, обусловленных принципом действия АБГ, и погрешностями входящих в (1) измеряемых величин, ограничениями и приближениями, а также погрешностями учёта вводимых поправок. В процессе создания ГЭТ 190-2019 были решены задачи минимизации составляющих НСП и подтверждения полученных значений расчётно-экспериментальным путём.

При использовании в составе АБГ стабилизированного по насыщенному поглощению в йоде лазера и рубидиевого стандарта частоты погрешности измерений перемещений пробного тела и соответствующих интервалов времени, формирующих исходные массивы данных $t_i(z_i)$, могут быть исключены из числа значимых.

Погрешность вертикального градиента в (1) можно оценить разными способами. Для измерений в произвольном месте в гравиметрической практике принято использование нормального вертикального градиента УСП $3,086 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-2}$ (3,086 мкГал/см) [8]. Такое допущение, естественно, увеличивает вклад соответствующей составляющей. Пространственное распределение УСП, измеренное на гравиметрическом пункте «Ломоносов-1», позволило получить для ГЭТ 190-2019 конкретное значение градиента и также сделать вклад этого параметра пренебрежимым.

Из числа входящих в (1) величин доминирующий вклад в НСП вносит погрешность измерения референтной высоты – высоты, к которой относится измеренное значение УСП [9]. Детальный учёт конструктивных элементов гравиметра и постаментов, относительно которого определяется высота, позволил уменьшить эту составляющую НСП до 0,3 мкГал.

Наряду с измеряемыми величинами и параметрами, входящими в уравнение измерений, источниками НСП являются физические ограничения, к которым в первую очередь относится конечная скорость света. Вследствие этого

необходимо введение поправки из-за задержки распространения светового сигнала от падающего пробного тела [10]:

$$\Delta g_c = \frac{3}{c} g_0 \left(V_0 + \frac{4}{7} g_0 t \right),$$

где V_0 – начальная скорость падения пробного тела, при которой начинается отсчёт интервалов пути и времени; t – полное время счёта интерференционных полос; c – скорость света.

Для АБГ-ВНИИМ-2 время счёта интерференционных полос составляет 0,1 с, а экспериментально определённый разброс начальных скоростей не превышает 0,1 м/с, составляющая НСП в этом случае не более 0,2 мкГал.

Также к физическим ограничениям можно отнести дифракционные ограничения в интерферометре гравиметра, обусловленные гауссовой структурой лазерного излучения [11]. При диаметре луча эталонного гравиметра 2,8 мм и учёте погрешности измерителя профиля лазерного излучения WinCam-D НСП составляет 0,3 мкГал.

Составляющими НСП также являются погрешности поправок, источниками которых служат технические ограничения и связанные с ними дополнительные воздействия на пробное тело в процессе броска.

Остаточный газ в вакуумной камере при падении пробного тела приводит к его торможению $\Delta g_{o,r}$, которое определяется параметрами гравиметра:

$$\Delta g_{o,r} = SVMP / (4kT),$$

где S – сечение пробного тела; V , M – средняя скорость и масса молекул газа; P – давление газа; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Применение в составе ГЭТ 190-2019 системы вакуумирования позволило уменьшить давление остаточного газа до 10^{-5} Па. С учётом погрешности системы контроля остаточного давления это позволило оценить соответствующую составляющую НСП значением 0,4 мкГал.

Вертикальный градиент магнитной индукции в вакуумной камере гравиметра также приводит к дополнительному ускорению пробного тела:

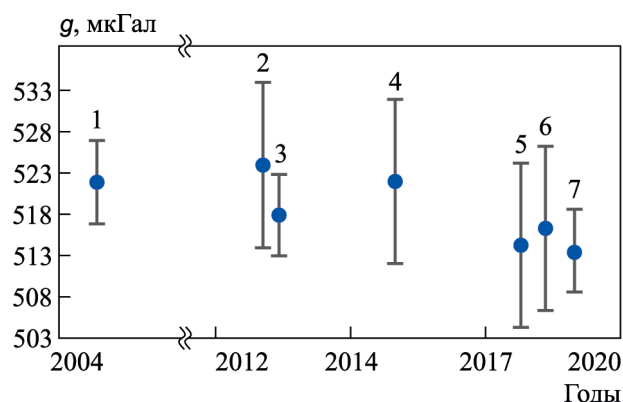
$$\Delta g = \frac{1}{m_0} \left(\mathbf{m} \frac{\partial \mathbf{B}_z}{\partial z} \right),$$

где $\mathbf{B}_z$ – вертикальная составляющая вектора магнитной индукции; $\mathbf{m}$ – наведённый магнитный момент пробного тела; m_0 – масса пробного тела.

Неоднородности магнитного поля определяли на основе результатов исследований магнитных полей узлов АБГ: ионного насоса, электродвигателя привода каретки, а также параметров локального лабораторного поля. По результатам экспериментальных данных изменена компоновка узлов, минимизирующая вертикальный градиент индукции. В результате с учётом характеристик точности применённого магнитометра МТ4 вклад магнитных явлений в НСП гравиметра не превысил 0,2 мкГал.

Составляющие НСП

Источник составляющей НСП	θ_i , мкГал
Поправка на атмосферное давление	0,10
Длина волны лазера	0,01
Частота опорного генератора	0,02
Референтная высота	0,30
Поправка на конечную скорость света	0,20
Дифракционная поправка	0,30
Поправка на торможение остаточным газом	0,40
Поправка на взаимодействие с магнитным полем	0,20
Поправка на собственное гравитационное притяжение	0,40
Юстировка вертикальности луча в измерительном плече интерферометра	0,60
Оптические элементы	0,30
Фазовые задержки электронных систем	0,40
Выбор начального и конечного интервала траектории ПТ	0,65
Границы НСП Θ	1,80



Результаты измерений ускорения свободного падения на гравиметрическом пункте «Ломоносов-1»:

1, 3 – гравиметры типа FG-5 (США), соответственно заводской номер 216 и 221; 2 – гравиметр типа FGL (США), заводской номер 105; 4, 5 – гравиметр типа FGL (США), заводской номер 106; 6 – гравиметр типа ГАБЛ-М (РФ); 7 – гравиметр типа АБГ-ВНИИМ-2 (РФ)

Results of measurements of the free fall acceleration at gravimetry site "Lomonosov-1":

1, 3 – FG-5 type gravimeter (USA), serial number 216 and 221; 2 – FGL type gravimeter (USA), serial number 105; 4, 5 – FGL type gravimeter (USA), serial number 106; 6 – GABL-M type gravimeter (RF); 7 – ABG-VNIIM-2 type gravimeter (RF)

Собственное гравитационное поле АБГ создаёт дополнительное ускорение пробного тела; значение ускорения определяется законом всемирного тяготения и распределением в пространстве массы деталей, узлов и блоков гравиметра. С учётом конструкции АБГ-ВНИИМ-2, входящего в состав ГЭТ 190-2019, а также рассмотренных допущений, погрешность поправки на гравитационное взаимодействие в качестве составляющей НСП составляет 0,4 мкГал.

К техническим ограничениям относится погрешность юстировки вертикальности луча в измерительном плече интерферометра. При использовании интерференционного контроля по жидкому зеркалу погрешность не превышает 8", что соответствует составляющей НСП 0,6 мкГал.

Погрешности оптических элементов интерферометра также являются техническим ограничением. Основные оптические элементы интерферометра были изготовлены с плоскостностью $\lambda/10$ (λ – длина волны) и параллельностью на уровне 3". Это может вносить в результат измерений погрешность на уровне 0,3 мкГал.

Наряду с оптическими элементами источником НСП являются электронные компоненты в системе детектирования и счёта интерференционных полос. Фазовая задержка, вносимая системой, определяется при тестировании с использованием программно сформированного сигнала, соответствующего фиксированному значению УСП. При этом погрешность определения задержки является составляющей НСП и для АБГ-ВНИИМ-2 не превышает 0,4 мкГал.

К систематическим составляющим также относится погрешность, связанная с зависимостью УСП при каждом броске пробного тела от выбора начального и конечного значений траектории, параметры которой (координата и время) использовались при обработке. Составляющая имеет сложную зависимость от окончательной юстировки электромеханической системы броска, определяющей компоненты дополнительных начальных ускорений пробного тела, и лазерно-интерференционной системы, формирующей пространственное распределение мод излучения. По результатам экспериментального исследования в пределах траектории броска, реализуемой баллистическим блоком, установлено, что для АБГ-ВНИИМ-2 эта составляющая НСП не превышает 0,65 мкГал.

Границы НСП Θ для ГЭТ 190-2019 рассчитаны как результат действия указанных составляющих θ_i в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011. «Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения»:

$$\Theta = \pm 1,4 \left(\sum_{i=1}^n \theta_i^2 \right)^{1/2}.$$

Границы НСП, а также вклады перечисленных составляющих приведены в таблице.

Случайную погрешность ГЭТ 190-2019 определяли по результатам серий длительных измерений УСП с использованием АБГ, установленного на гравиметрическом пункте. При этом уменьшения погрешности удалось добиться за счёт введения активной ступени в систему виброизоляции опорного отражателя лазерного интерферометра гравиметра.

В условиях внешних сейсмогравитационных техногенных помех, уровень которых в месте расположения ГЭТ 190-2019 за последние годы существенно вырос, эта мера оказалась наиболее эффективной. Уменьшению случайной погрешности также способствовало уменьшение угловых составляющих движения пробного тела, которые непосредственно зависят от качества броска и определяются выбором режима электромеханической системы и качеством юстировки узла захвата пробного тела. Применение лазера с функцией перезахвата частоты позволило уменьшить случайную погрешность, связанную с влиянием сильных внешних возмущений. Расширение частотного диапазона фотоприёмного устройства обеспечило уменьшение искажений интерференционного сигнала, которые также являются источниками случайной погрешности. Наряду с указанными мерами, направленными на повышение точности ГЭТ 190-2019, универсальным способом уменьшения случайной погрешности является увеличение объёма измерительной информации. Это стало возможным в результате увеличения количества бросков при измерениях в АБГ-ВНИИМ-2 при увеличении его надёжности и ресурса.

Единица воспроизводится при значении УСП в месте расположения гравиметрического пункта ГЭТ 190-2019. При этом диапазон измерения ускорения свободного падения с помощью АБГ соответствует реальным ускорениям на поверхности Земли, изменяющимся от максимальных значений на полюсах до минимальных на экваторе. Проверка диапазона проводилась с использованием тестовых сигналов, параметры которых (длительность, амплитуда и частота) соответствуют интерференционному сигналу гравиметра при бросках пробного тела в условиях действия УСП с заданными значениями. Тестовые сигналы, сформированные для заданных значений УСП, соответствующих граничным и среднему значениям диапазона (9,77; 9,85; 9,81 м/с²), поступали на вход измерительной системы АБГ. Результаты обработки в сериях по 100 бросков подтвердили соответствие заданным значениям УСП в пределах случайной погрешности, для которой максимальное значение среднего квадратического отклонения (СКО) в серии не превышало 0,45 мкГал. Полученные результаты, в том числе случайная составляющая, не значимая по сравнению со случайной погрешностью АБГ, подтверждают заданный диапазон АБГ из состава ГЭТ 190-2019.

На рисунке представлены результаты измерений абсолютного значения УСП, выполненные с помощью АБГ-ВНИИМ-2 из состава ГЭТ 190-2019 на гравиметрическом пункте «Ломоносов-1» и полученные в разное время с помощью других зарубежных FG-5, FGL (США) и отечественных ГАБЛ-М высокоточных гравиметров. Полученные результаты подтверждают точностные характеристики АБГ-ВНИИМ-2 из состава ГЭТ 190-2019.

Заключение. ГЭТ 190-2019 позволяет успешно реализовать все функции, связанные с поддержанием единства измерений в гравиметрии в Российской Федерации: поверку и калибровку эталонов и СИ, испытания с целью утверждения типа СИ, участие в сличениях. По основным метрологическим

и техническим характеристикам ГЭТ 190-2019 соответствует лучшим зарубежным аналогам.

В перспективе планируется проведение исследований с целью введения в состав ГЭТ 190-2019 криогенного относительного гравиметра, а также разработанного и находящегося в опытной эксплуатации транспортируемого АБГ. Это позволит существенно расширить функциональные возможности ГЭТ 190-2019 при передаче единицы и повысить уровень метрологического обеспечения находящейся в эксплуатации гравиметрической аппаратуры.

Список литературы

1. Vitushkin L. F. (2014) *Absolute Gravity Measurements*. In: Grafarend E. (eds) *Encyclopedia of Geodesy*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02370-0_25-1
2. Пат. № 2475786 РФ / Л. Ф. Витушкин, О. А. Орлов // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 5.
3. M. de Angelis, A. Bertoldi, L. Cacciapuoti, A. Giorgini, G. Lamporesi, M. Prevedelli, G. Saccorotti, F. Sorrentino, and G. M. Tino, *Meas. Sci. Technol.*, 2009, vol. 20, no. 2, 022001 (16 pp). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/2/022001>
4. Robinson I. A., Schlamminger S., *Metrologia*, (2016) vol. 53, no. 5, pp. A46–A74. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/5/A46>
5. Torge W. (1998) *The changing role of gravity reference networks*. In: Forsberg R., Feissel M., Dietrich R. (eds) *Geodesy on the Move*. International Association of Geodesy Symposia, vol. 119. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-72245-5_1
6. Vitushkin L. F., Orlov O. A., *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5856, pp. 281–286. <https://doi.org/10.1117/12.611883>
7. Goodkind J. M., *Rev. Sci. Instruments*, 1999, vol. 70, no. 11, pp. 4131–4152. <https://doi.org/10.1063/1.1150092>
8. Torge W. (1989) *Gravimetry*. De Gruyter GmbH, Berlin, New York. 482 p.
9. Pálinkáš V., Liard J., Jiang Z., *Metrologia*, 2012, vol. 49, no. 4, pp 552–559. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/4/552>
10. Nagorny V. D., Zanimoskiy Y. M., Zanimoskiy Y. Y., *Metrologia*, 2011, v. 48, no. 3, pp. 101–113. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/3/C01>
11. Robertsson L., *Metrologia*, 2007, vol. 44, no. 1, pp. 35–39. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/44/1/005>

References

1. Vitushkin L. F. (2014) *Absolute Gravity Measurements*. In: Grafarend E. (eds) *Encyclopedia of Geodesy*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02370-0_25-1
2. Vitushkin L. F., Orlov O. A., *Absolute ballistic gravimeter*, RF Patent no. 2475786 (06 May 2013).
3. M. de Angelis, A. Bertoldi, L. Cacciapuoti, A. Giorgini, G. Lamporesi, M. Prevedelli, G. Saccorotti, F. Sorrentino, and G. M. Tino, *Meas. Sci. Technol.*, 2009, vol. 20, no. 2, 022001 (16 pp). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/2/022001>
4. Robinson I. A., Schlamminger S., *Metrologia*, (2016) vol. 53, no. 5, pp. A46–A74. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/5/A46>

5. Torge W. (1998) *The changing role of gravity reference networks*. In: Forsberg R., Feissel M., Dietrich R. (eds) *Geodesy on the Move*. International Association of Geodesy Symposia, vol. 119. Springer, Berlin, Heidelberg.

https://doi.org/10.1007/978-3-642-72245-5_1

6. Vitushkin L. F., Orlov O. A., *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5856, pp. 281–286. <https://doi.org/10.1117/12.611883>

7. Goodkind J. M., *Rev. Sci. Instruments*, 1999, vol. 70, no. 11, pp. 4131–4152. <https://doi.org/10.1063/1.1150092>

8. Torge W. (1989) *Gravimetry*. De Gruyter GmbH, Berlin, New York. 482 p.

9. Pálinkáš V., Liard J., Jiang Z., *Metrologia*, 2012, vol. 49, no. 4, pp 552–559.

<https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/4/552>

10. Nagornyi V. D., Zanimonskiy Y. M., Zanimoskiy Y. Y., *Metrologia*, 2011, v. 48, no. 3, pp. 101–113.

<https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/3/C01>

11. Robertsson L., *Metrologia*, 2007, vol. 44, no. 1, pp. 35–39. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/44/1/005>

Дата поступления: 08.04.2020.

Дата принятия: 14.05.2020.

State special primary acceleration measurement standard for gravimetry GET 190-2019

Leonid F. Vitushkin, Fedor F. Karpeshin, Evgeny P. Krivtsov, Pavel P. Krolitsky,
Vladimir V. Nalivaev, Oleg A. Orlov, Mihail M. Khaleev

D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: eluar@mail.ru, fkarpehin@gmail.com, e.p.krivtsov@vniim.ru, pash1434@yandex.ru, nvlad2@yandex.ru, oorl@mail.ru, mmhal@mail.ru

The State special primary acceleration measurement standard for gravimetry (GET 190-2019), its composition, principle of operation and basic metrological characteristics are presented. This standard is on the upper level of reference for free-fall acceleration measurements. Its accuracy and reliability were improved as a result of optimisation of the adjustment procedures for measurement systems and its integration within the upgraded systems, units and modern hardware components.

A special attention was given to adjusting the corrections applied to measurement results with respect to procedural, physical and technical limitations. The used investigation methods made it possible to confirm the measurement range of GET 190-2019 and to determine the contributions of main sources of errors and the total value of these errors. The measurement characteristics and GET 90-2019 were confirmed by the results obtained from measurements of the absolute value of the free fall acceleration at the gravimetric site "Lomonosov-1" and by their collation with the data of different dates obtained from measurements by high-precision foreign and domestic gravimeters.

Topicality of such measurements ensues from the requirements to handle the applied problems that need data on parameters of the Earth gravitational field, to be adequately faced. Geophysics and navigation are the main fields of application for high-precision measurements in this field.

Key words: gravimetry, free fall acceleration, geoid, gravimetry site, absolute ballistic gravimeter.