

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ГРАВИМЕТРИЯ САЛАСЫНДАҒЫ МЕТРОЛОГИЯЛЫҚ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУ ТУРАЛЫ

АҢДАТПА

Аннотация: Мақалада Қазақстан Республикасында еркін құлаудың (гравиметрлердің) үдеуін өлшеуге арналған аспаптарды метрологиялық қамтамасыз ету мәселелері қарастырылады. Еркін құлаудың үдеуінің шамасы, қазіргі гравиметрлер және оларды қолдану салалары туралы жалпы мәліметтер келтірілген. Абсолютті гравиметрлер үшін ауырлық күшінің үдеу бірлігінің қадағалануын қамтамасыз ету құрылымы, сондай-ақ салыстырмалы гравиметрлерді калибрлеу әдістері қысқаша сипатталған. Қазақстан Республикасында гравиметрлердің өлшем бірлігін қамтамасыз етудің мемлекеттік жүйесінің тізіліміне енгізу проблемаларына ерекше назар аударылды. Қорытындыда көрсетілген мәселелерді шешу үшін ұсыныстар ұсынылады.

Түйінді сөздер: гравиметр, ауырлық күшінің үдеуі, бақылау

Р. Сермягин: "Ұлттық геодезия және кеңістіктік ақпарат орталығы" ШЖҚ РМК, Өскемен қ., Қазақстан.

Б. Раймбекова: "КазСтандарт" РМК ШҚФ жетекші маманы, Өскемен қ., Қазақстан.

b.raimbekova@ksm.kz.

О МЕТРОЛОГИЧЕСКОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ В ОБЛАСТИ ГРАВИМЕТРИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

АННОТАЦИЯ

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы метрологического обеспечения приборов для измерения ускорения свободного падения (гравиметров) в Республике Казахстан. Приводятся общие сведения о величине ускорения свободного падения, современных гравиметрах и областях их применения. Кратко описана структура обеспечения прослеживаемости единицы ускорения свободного падения для абсолютных гравиметров, а также способы калибровки относительных гравиметров. Особое внимание уделено проблемам внесения в реестр государственной системы обеспечения единства измерений гравиметров в Республике Казахстан. В заключении предлагаются рекомендации для решения обозначенных проблем.

Ключевые слова: гравиметр, ускорение свободного падения, прослеживаемость

Р. Сермягин: РГП на ПХВ «Национальный центр геодезии и пространственной информации», г. Усть-Каменогорск, Казахстан.

Б. Раймбекова: ведущий специалист ВКФ РГП «КазСтандарт», г. Усть-Каменогорск, Казахстан.

b.raimbekova@ksm.kz.

ON METROLOGICAL SUPPORT IN THE FIELD OF GRAVIMETRY OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ANNOTATION

Annotation: The article discusses the issues of metrological support of devices for measuring the acceleration of gravity (gravimeters) in the Republic of Kazakhstan. General information is provided on the magnitude of the acceleration of free fall, modern gravimeters and their applications. The structure of ensuring the traceability of the gravity acceleration unit for absolute gravimeters, as well as methods for calibrating relative gravimeters, is briefly described. Special attention is paid to the problems of entering into the register of the state system for ensuring the uniformity of measurements of gravimeters in the Republic of Kazakhstan. In conclusion, recommendations are offered for solving the identified problems.

Keywords: gravimeter, acceleration of gravity, traceability

R. Sermyagin: National Center for Geodesy and Spatial Information, Astana, Kazakhstan.

B. Raimbekova: leading specialist of the VKF RSE "KazStandart", Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.

b.raimbekova@ksm.kz.





ВВЕДЕНИЕ

Единица измерения ускорения свободного падения (или «ускорения силы тяжести»), обозначаемая как g , должна определяться в рамках единой системы единиц, как и любая другая физическая величина. Однако, ввиду того, что значение этой величины зависит от местоположения и может изменяться во времени, создание статического эталона для неё невозможно.

Определение ускорения свободного падения g осуществляется путем измерения двух физических величин: длины и времени. Методы измерения g эволюционировали с развитием технологий, обеспечивающих высокую точность в измерении этих параметров. В настоящее время, а также в обозримом будущем, основным методом остается баллистический метод, основанный на наблюдении за свободным падением пробной массы в вакууме.

Обычная точность измерения абсолютного значения ускорения свободного падения в последние десятилетия составляет порядка нескольких 10^{-8} м/с². Для удобства часто используется внесистемная единица Гал, а также её производные – мГал и мкГал. Достижение такой высокой точности обеспечивается использованием эталонов длины (лазерная система) и времени (атомные часы) с исключительной стабильностью (на уровне 10^{-9} и выше) [1].

В настоящее время существуют два конкурирующих типа абсолютных гравиметров, а именно – классические абсолютные баллистические гравиметры, основанные на падении механического тела, например, известные и широко используемые во всем мире гравиметры Micro-g LaCoste [2] (США), и атомные (или «квантовые») абсолютные баллистические гравиметры, в которых в свободном падении находится облако охлаждённых лазером атомов, например, абсолютный гравиметр AQG от компании iXblue (Франция) [3]. Подробный обзор современных гравиметров можно найти в работах [4–7].

Второй возможный метод измерения ускорения силы

тяжести — относительный метод, при котором определяется не полная величина g , а её разность, часто называемая приращением силы тяжести и обозначаемая Δg . Очевидно, что для определения этой величины достаточно измерить одну из составляющих g : длину или время.

На протяжении XX века способы и точность измерения Δg существенно изменялись, однако в настоящее время актуальными остаются два подхода: измерение растяжения упругой системы (пружины) и измерение электрических сигналов, связанных с изменением магнитного поля в сверхпроводящем контуре. Последний способ, впрочем, весьма специфичен и применяется исключительно в стационарных сверхпроводящих (или «криогенных») гравиметрах. Эти приборы, к слову, являются самыми чувствительными среди всех существующих, однако не используются в массовом производстве.

Пружинные гравиметры остаются одними из наиболее массово используемых в гравиметрических съемках, и их калибровка по-прежнему актуальная задача.

Гравиметры находят применение во многих отраслях, одной из которых является геодезия. Для решения задач геодезии требуются данные о распределении g на поверхности Земли, которые обычно называют «гравиметрическими съемками». Важным аспектом таких работ является минимизация систематических ошибок, обусловленных, в первую очередь, особенностями используемых гравиметров.

До появления абсолютных баллистических гравиметров основным способом распространения единой системы единиц в гравиметрии были опорные гравиметрические сети, создаваемые с использованием относительных маятниковых и пружинных гравиметров. Основное несовершенство этих приборов заключалось в отличиях их шкал. Для приведения шкал к единой мере относительные гравиметры нуждались в калибровке, которую как правило выполняли на эталонных гравиметрических базах.



С появлением и распространением абсолютных баллистических гравиметров с 1970-х годов и до начала 2000-х годов использование относительных гравиметров для распространения единицы g в мировом масштабе прекратилось. Тем не менее, для локальных и региональных сетей их калибровка остается актуальной. Разрабатываемая в последние годы новая Международная гравиметрическая система отсчета (International Terrestrial Gravity Reference Frame – ITGRF) [8] основывается на ключевых сравнениях абсолютных гравиметров [9].

Национальные отсчетные гравиметрические основы создаются с помощью абсолютных гравиметров. При этом они не формируют «сеть» в привычном смысле, поскольку связи между пунктами отсутствуют [10]. Однако при дальнейшем сгущении и, в конечном итоге, при сплошной гравиметрической съемке неизбежно будут использоваться относительные гравиметры, так как при увеличении числа пунктов себестоимость их применения значительно ниже, чем у абсолютных гравиметров.

Величина ускорения силы тяжести также имеет большое значение при точных измерениях других физических величин, таких как давление или крутящий момент. Для обеспечения однозначности таких измерений необходима прослеживаемость ускорения силы тяжести как минимум на уровне 10^{-6} м/с² [11].

ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ АБСОЛЮТНЫХ ГРАВИМЕТРОВ

Главным документом, определяющим прослеживаемость в абсолютной гравиметрии, является Стратегия для метрологии в абсолютной гравиметрии CCM-IAG [12].

Из-за отсутствия физического эталона g , основой метрологии в гравиметрии являются регулярные сравнения (или «сличения») абсолютных гравиметров. Их разделяют на несколько уровней:

1. Ключевые сравнения CIPM (CIPM KC) – их основная цель заключается в проверке на уровне CIPM заявленных калибровочных возможностей измерений (Calibration Measurement Capability –MRA) СМС). В них могут принимать участие все желающие организации, но лишь результаты организаций-участников KC, относящихся к национальным метрологическим институтам (NMI) или назначенным организациям (Designated Institutes, DI), попадают в базу данных ключевых сравнений KCDB CIPM, которая служит официальным регистром признанных измерительных возможностей. [13, 14].

2. Регулярные ключевые сравнения (RMO KC) – проводятся для проверки СМС на основе опубликованных в KCDB CIPM посредством участия нескольких абсолютных гравиметров, входящих в KCDB CIPM. Как правило такие сравнения проводятся на уровне региональных метрологических организаций [15].

3. Последующие двусторонние ключевые сравнения необходимы для проверки заявленных СМС через CIPM KC и RMO KC.

4. Дополнительные сравнения выходят за рамки Соглашения о взаимном признании (Mutual Recognition Arrangement – CIPM и могут быть организованы кем угодно в любое время (участие открыто) [16].

Прослеживаемость для измерений, выполняемых с абсолютными гравиметрами может определяться двумя путями:

1. Независимая прослеживаемость к единице СИ путём ключевых сравнений (CIPM KC, RMO KC, двусторонние сравнения и дополнительные сравнения);

2. Калибровка сравнением путём сравнения с эталонным гравиметром или со значением силы тяжести опорного пункта.

В настоящее время на международном уровне прослеживаемость измерений ускорения силы тяжести обеспечена для 11-ти национальных метрологических институтов с декларированными СМС с расширенной неопределенностью от $4 \cdot 10^{-8}$ до $2 \cdot 10^{-7}$ м/с².

Таким образом, прослеживаемость измерений абсолютного значения ускорения силы тяжести однозначно определяется озвученной стратегией. В работах [17, 18] наглядно показана роль сравнений абсолютных гравиметров в точности передачи единицы g . По другому обстоит дело с калибровкой относительных гравиметров, которые мы рассмотрим в следующем разделе.

КАЛИБРОВКА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ГРАВИМЕТРОВ

Существует множество способов калибровки относительных гравиметров, которые могут меняться в зависимости от особенностей чувствительной системы и специфики применения прибора. Однако, самым распространенным и действенным способом является калибровка на базисе. Эталонное приращение Δg может быть получено либо более точным относительным гравиметром (или группой гравиметров), которые сами по себе также требуют калибровки. Такой подход менее распространён из-за необходимости наличия калиброванной группы гравиметров. В большинстве случаев предпочтение отдаётся абсолютным гравиметрам, так как они обеспечивают независимость от предыдущих измерений. Таким образом, прослеживаемость распространяется на относительные гравиметры, и в конечном итоге – на гравиметрические съемки.

Определение калибровочной функции относительного гравиметра выполняет производитель гравиметра, однако, ее контроль и уточнение является задачей и ответственностью пользователя.

Известно множество калибровочных базисов, которые условно можно разделить на горизонтальные и вертикальные [1]. Одна из важнейших характеристик базиса – это максимальное приращение (диапазон). Калибровочная функция может быть определена только внутри этого диапазона (экстраполяция недопустима). Наиболее удобными в использовании являются вертикальные базисы [19–21]. При отсутствии возможности их создания (горная местность), используют изменение g вдоль меридиана [22].

В отличие от абсолютных гравиметров и гравиметрических пунктов, ни одного СМС эталонного гравиметрического базиса не представлены в CIPM. Это является формальной проблемой для использования существующих базисов при аттестации относительных гравиметров в рамках существующего законодательства. Рассмотрим подробнее особенности регламентирующих подзаконных актов Республики Казахстан, применимых для аттестации гравиметрических приборов.



**ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИ
ОТСУТСТВИИ ЭТАЛОНА И МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ
БАЗЫ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН**

Правила утверждения типа испытаний, утверждения типа и метрологической аттестации средств измерений определяются приказом № 931 [23]. Порядок проведения испытаний и утверждения типа СИ определяется национальным стандартом Республики Казахстан СТ РК 2.21-2019 [24], а программа испытаний для целей утверждения типа СИ – государственным стандартом Республики Казахстан СТ РК 2.6-2003 [25].

В соответствии с п. 4.13 СТ РК 2.21-2019, испытания для целей утверждения типа средства измерения проводятся Государственным научным метрологическим центром (ГНМЦ), в том числе с использованием материально-технической базы аккредитованных испытательных, поверочных и калибровочных лабораторий Республики Казахстан и третьих стран. Согласно п. 5.1.1 и Ж 1.2 СТ РК 2.21-2019, при использовании материально-технической базы испытательных лабораторий третьих стран могут проводиться дистанционные испытания, при условии аккредитации этой лаборатории по ISO/IEC 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий» или обеспечения метрологической прослеживаемости путем предоставления сертификатов калибровки эталонов лаборатории, аккредитованной согласно ISO/IEC 17025-2019

В соответствии с п. Ж.2.4 и Ж.2.5 СТ РК 2.21-2019, при проведении операций продолжительностью более 8 часов допускается предоставление вместо видеозаписи фотографий с зафиксированными результатами измерений. По результатам испытаний аккредитованная лаборатория или **производитель СИ** предоставляет протоколы испытаний.

Можно выделить несколько проблемных моментов:

1. Зарубежные аккредитованные лаборатории, как правило выполняют калибровку только абсолютных гравиметров или гравиметрических пунктов, но не относительных гравиметров на калибровочном базисе [12].
 2. Использование абсолютного гравиметра, находящегося во владении организации, которая не является ГНМЦ, затруднено из-за отсутствия распространенной практики на территории Республики Казахстан.
 3. Аккредитованные зарубежные лаборатории, как правило, не обладают необходимым оборудованием для проведения испытаний на воздействие внешней среды и климата, которые требуются для утверждения типа средства измерений. При отсутствии по близости других испытательных центров, имеющих необходимое оборудование (например, климатическую камеру), испытания на воздействие внешней среду выполнить проблематично.
 4. В настоящее время отсутствуют известные гравиметрические базисы, которые по формальным признакам соответствовали бы требованиям сертификации по стандарту ISO 17025.
- Например, для утверждения типа серийного абсолютного гравиметра требуется лаборатория, оснащённая как вибростендом, так и климатической камерой. Однако наличие такого оборудования в одной

лаборатории встречается крайне редко, что делает проведение испытаний затруднительным. Для этого, например, испытания на воздействие вибраций допустимо выполнять с помощью перевозки в автомобиле по пересеченной местности. Проблемой испытаний для относительных гравиметров также является наличие поблизости испытательных центров, имеющих необходимо оборудование. Это связано с тем, что гравиметрические базисы как правило расположены либо в горной местности, либо простираются вдоль меридиана на несколько сотен километров, т. е. они зависят от географических условий, в то время как испытательные центры расположены в местах с развитой инфраструктурой.

Следует заметить, в Республике Казахстан отсутствует государственный стандарт в области гравиметрии, регулирующий обеспечение метрологической прослеживаемости, такой как, например, поверочная схема средств измерения ускорения свободного падения [26].

Необходимо подчеркнуть важность решения обозначенных проблем. Это связано прежде всего с тем, что в последние годы количество пользователей гравиметров в Казахстане значительно выросло. Например, число современных относительных гравиметров, типа CG-5 и CG-6 в настоящее время насчитывается более 20 экземпляров, однако до сих пор в реестр средств измерений ни один из этих серийных приборов не внесен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отсутствие в Республике Казахстан лаборатории, оснащённой материально-технической базой для выполнения полного цикла испытаний гравиметров, требует рационального подхода к организации исследований. Оптимальным решением представляется разделение процессов на два этапа: определение метрологических характеристик гравиметров и проверка их стабильности при воздействии внешних факторов. Подтверждение стабильности метрологических характеристик может быть обеспечено через контрольные измерения до и после воздействия на приборы внешних условий. Такой подход позволяет выполнять испытания влияния внешних факторов в специализированных лабораториях с необходимым оборудованием, в то время как определение метрологических характеристик может проводиться при сравнении с эталоном в зарубежных гравиметрических лабораториях.

Абсолютный гравиметр, являясь дорогостоящим прибором, требует значительных затрат на приобретение и содержание в качестве национального эталона. В условиях отсутствия государственной метрологической инфраструктуры такого уровня, ответственность за его содержание и калибровку ложится на организации, обладающие данной аппаратурой. Это приводит к необходимости регулярной калибровки в зарубежных лабораториях, что влечёт за собой значительные финансовые и организационные издержки. В таких условиях данные организации фактически выполняют функции государственной метрологической службы, финансируя обеспечение единства измерений за свой счёт.



Эта проблема может быть решена, если государственный эталон будет содержаться назначенным институтом. Такая практика существует как в мире, так и в Казахстане, и может быть применена для случая с абсолютным гравиметров. Например, в ключевых сличениях абсолютных гравиметров 2023 года как минимум 3 из 15 организации, результаты которых вносятся в базу данных ключевых сравнений, являются назначенными институтами [14]. Условием для этих организаций должно стать обязательное участие в ключевых международных сравнениях абсолютных гравиметров, что обеспечит соответствие требованиям международных стандартов.

Финансирование мероприятий, связанных с участием в международных сравнениях, а также содержание национального эталона, должно осуществляться за счёт государственного бюджета. Такой подход позволит снизить финансовую и организационную нагрузку на отдельные организации, повысить уровень метрологического обеспечения в стране и укрепить её позиции в международной метрологической системе.

Кроме этого, необходимо устранить пробелы, связанные с отсутствием регулирующих нормативных документов для средств измерения ускорения свободного падения в Республики Казахстан, такие как поверочная схема и методики поверки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Torge, W. Gravimetry / W. Torge. Berlin ; New York: W. de Gruyter, 1989.
2. FG5-X Absolute Gravimeter User's Manual Micro-g LaCoste, 2015.
3. Ménoret, V. et al. [Gravity measurements below 10⁻⁹ g with a transportable absolute quantum gravimeter](#) / V. Ménoret et al. // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8, № 1. – P. 12300.
4. Timmen, L. [Absolute and Relative Gravimetry](#) / L. Timmen // Sciences of Geodesy - I / Xu, G., ed. Berlin, Heidelberg – 2010. -. P. 1–48.
5. Crossley, D., Hinderer, J., Riccardi, U. The measurement of surface gravity / D. Crossley, J. Hinderer, U. Riccardi // Reports on Progress in Physics. – 2013. – Vol. 76, № 4. – P. 46101.
6. Hugill, A. [Gravimeters](#) / A. Hugill // Encyclopedia of Solid Earth Geophysics / Gupta, H.K., ed. Cham – 2021. -. P. 578–585.
7. Fang, J. et al. [Classical and Atomic Gravimetry](#) / J. Fang et al. // Remote Sensing. – 2024. – Vol. 16, № 14. – P. 2634.
8. Wziontek, H. et al. [Status of the International Gravity Reference System and Frame](#) / H. Wziontek et al. // Journal of Geodesy. – 2021. – Vol. 95, № 1. – P. 7.
9. Wziontek, H. et al. [Comparisons of Absolute Gravimeters as a Key Component of the International Terrestrial Gravity Reference Frame \(ITGRF\) Shown on the Example of the WET-CAG2021 at Wettzell, Germany](#) / H. Wziontek et al. // Berlin, Heidelberg – 2023.
10. Mäkinen, J., Sękowski, M., Krynski, J. [The Use of the A10-020 Gravimeter for the Modernization of the Finnish First Order Gravity Network](#) / J. Mäkinen, M. Sękowski, J. Krynski // Geoinformation Issues. – 2010. – Vol. 2, № 1. – P. 5–17.
11. Germak, A., Prato, A., Astrua, M. [Traceability of gravity acceleration measurement in calibration laboratories](#) / A. Germak, A. Prato, M. Astrua // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1065, – P. 162005.
12. Marti, U. et al. CCM – IAG Strategy for Metrology in Absolute Gravimetry / U. Marti et al. // – 2014. – P. 8.
13. Wu, S. et al. [The results of 10th International Comparison of Absolute Gravimeters \(ICAG-2017\)](#) / S. Wu et al. // Journal of Geodesy. – 2021. – Vol. 95, № 6. – P. 63.
14. Ullrich, C. et al. [CCM.G-K2.2023: CIPM key comparison of absolute gravimeters](#) / C. Ullrich et al. // Metrologia. – 2024. – Vol. 61, № 1A. – P. 07009.
15. Falk, R. et al. [Final report of EURAMET.M.G-K3 regional comparison of absolute gravimeters](#) / R. Falk et al. // Metrologia. – 2020.
16. Mäkinen, J. et al. [RFCAG2013: Russian-Finnish comparison of absolute gravimeters in 2013](#) / J. Mäkinen et al. // Journal of Geodetic Science. – 2016. – Vol. 6, № 1.
17. Schilling, M., Timmen, L. [Traceability of the Hannover FG5X-220 to the SI Units](#) / M. Schilling, L. Timmen // International Symposium on Earth and Environmental Sciences for Future Generations / Freymueller, J.T. Sánchez, L., eds. Cham – 2016. -. P. 69–75.
18. Smith, V.A. et al. [Twelve Years of High Frequency Absolute Gravity Measurements at the UK's Space Geodesy Facility: Systematic Signals and Comparison with SLR Heights](#) / V.A. Smith et al. // 5th Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2019) / Freymueller, J.T. Sánchez, L., eds. Cham – 2021. -. P. 97–103.
19. Richter, B., Wilmes, H., Nowak, I. [The Frankfurt calibration system for relative gravimeters](#) / B. Richter, H. Wilmes, I. Nowak // Metrologia. – 1995. – Vol. 32, № 3. – P. 217–223.
20. Sas, A. et al. [Vertical Gravimetric Calibration Baseline in the Tatra Mountains of Poland](#) / A. Sas et al. // Geoinformation Issues. – 2009. – Vol. 1, № 1. – P. 19–32.
21. Marti, U. et al. [A First Traceable Gravimetric Calibration Line in the Swiss Alps](#) / U. Marti et al. // IGFS 2014 / Jin, S. Barzaghi, R., eds. Cham – 2015. -. P. 17–25.
22. Полигон Казанский гравиметрический : {Описание типа средства измерений} – 2016.
23. Приказ Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 27 декабря 2018 г. № 931 об утверждении Правил утверждения типа, испытаний для целей утверждения типа, метрологической аттестации средств измерений и оказания государственных услуг «Выдача сертификата об утверждении типа средств измерений» и «Выдача сертификата о метрологической аттестации средств измерений», формы сертификата об утверждении типа средств измерений и установленной формы знака утверждения типа – 2018.
24. СТ РК 2.21-2019 Государственная система обеспечения единства измерений Республики Казахстан. Национальный стандарт Республики Казахстан. Порядок проведения испытаний и утверждения типа средств измерений / СТ РК 2.21-2019 // – 2020.
25. СТ РК 2.6-2003 Программа испытаний для целей утверждения типа средства измерений / СТ РК 2.6-2003 // – 2004.
26. Государственная поверочная схема для средств измерений ускорения свободного падения – 2021.