

А. С. Ельчин¹✉, И. С. Сизиков^{1,2}, Д. А. Носов^{1,2}, А. Ю. Тимиртдинов^{1,2}

Комплекс исследований в рамках модернизации абсолютных баллистических гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

²Публично-правовая компания «Роскадастр», г. Москва, Российская Федерация

e-mail: elchinas@iae.nsk.su

Аннотация. В данной статье представлены наиболее важные результаты комплекса работ в рамках модернизации абсолютных баллистических гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ. Результат исследований с альтернативным расположением магниторазрядного насоса исключает его влияние на движение свободно падающего тела. Разработана система автоматического определения высоты гравиметра с использованием лазерных датчиков, которая улучшает метрологические характеристики гравиметра. Результаты испытаний показали, что модернизированная система выставления гравиметра по вертикали является более точной. Проведен расчёт поправки за самопритяжение для гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ.

Ключевые слова: гравиметрия, самопритяжение, система выставления гравиметра по вертикали

A. S. Elchin¹✉, I. S. Sizikov^{1,2}, D. A. Nosov^{1,2}, A. Yu. Timirtdinov^{1,2}

Researches within the modernization of absolute ballistic gravimeters of the GABL/GBL type

¹Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Public Law Company “Roskadastr”, Moscow, Russian Federation

e-mail: elchinas@iae.nsk.su

Abstract. This paper presents the most significant results obtained during the modernization of absolute ballistic gravimeters of the GABL/GBL type. The results of studies with an alternative location of the ion pump exclude its influence on the motion of a free-falling body. A system for automatic determination of the gravimeter’s height using laser sensors has been developed, which enhances the metrological characteristics of the gravimeter. Test results showed that the upgraded vertical gravimeter alignment system is more accurate. A self-gravity correction was calculated for GABL/GBL gravimeters.

Keywords: gravimetry, self-attraction, gravimeter vertical alignment system

Введение

С целью открытия и определения запасов месторождений (газовых или нефтяных) и составления проекта их разработки проводятся поисково-разведочные работы, которые делят на три основных этапа: общая геологическая съемка, детальная структурно-геологическая съемка и детальная разведка открытого нефтяного или газового месторождения [1]. На втором этапе работ применяют геофизические и геохимические методы, позволяющие более детально изучить

строение недр и выделить площади, перспективные для глубоко бурения с целью поиска залежей нефти и газа. Геофизические методы разведки основаны на измерении физических полей Земли, которые делятся на естественные (гравиметрия, магнитометрия, радиометрия и др.) и искусственно созданные (сейсморазведка, акустическая разведка и др.).

Гравиметрический метод основан на измерении силы притяжения на поверхности Земли с помощью гравиметров. Если пласт горизонтальный, то показатели, обычно, стабильны, если в пласте присутствуют складки и синклинали, то возникают аномалии в измерениях [2].

Гравиметрические измерения делятся на абсолютные и относительные. Абсолютные измерения силы тяжести используются в качестве опорных для гравиметрических наблюдений с применением относительных гравиметров. Наличие абсолютных опорных гравиметрических пунктов (АОГП), расположенных в центре месторождений, существенно сокращает продолжительность гравиметрического рейса и обеспечивает равномерное и однородное по точности измерений покрытие всей площади месторождения. Кроме того, полученное значение силы тяжести на абсолютном пункте не связано с другими пунктами относительными измерениями [3].

Также абсолютные гравиметрические наблюдения являются важной частью исследования современных вертикальных движений земной поверхности при мониторинге месторождений полезных ископаемых [4]. Огромное значение имеет изучение геодинамических процессов в районах разработки месторождений, где возможны опускания, быстрые движения земной поверхности и оползни [5, 6, 7, 8, 9].

Требуемую точность (первые единицы мкГал) определения абсолютных значений силы тяжести обеспечивают современные баллистические лазерные гравиметры как отечественного, так и иностранного производства. На территории Российской Федерации для гравиразведки и мониторинга месторождений полезных ископаемых в настоящее время широко используются полевые абсолютные гравиметры типа ГАБЛ/ГБЛ отечественного производства, среднеквадратическая ошибка измерения которых составляет 2-3 мкГал [10, 11, 12, 13, 14]. Но, как и все прецизионные приборы и устройства, эти гравиметры обладают рядом неучтенных систематических ошибок, например, наиболее весомой из которых является ошибка, связанная с влиянием внешнего магнитного поля на свободно падающее тело (СПТ).

Современные абсолютные гравиметры являются очень сложными по настройке и подготовке к измерениям устройствами, требующие от оператора больших знаний об их конструкции и принципе работы. Соответственно, обслуживающий персонал проходит длительное обучение и специальную подготовку для допуска к работе с прибором и его техническому обслуживанию. Кроме того, абсолютные гравиметры имеют относительно небольшой ресурс времени (циклов единичного броска) работы до проведения профилактических работ и ремонта. Поэтому необходимо постоянно проводить исследования в поисках методов усовершенствования различных узлов и систем настройки и контроля гравиметров, в том числе и для достижения целей:

максимально увеличить ресурс их работы и полностью автоматизировать процесс подготовки к измерениям.

Ранее были рассмотрены возможные пути модернизации абсолютных гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ с целью улучшения метрологических характеристик и автоматизации процесса подготовки прибора к измерениям [15]. Проанализировав результаты проделанных исследований, был выполнен комплекс работ, связанных с расчетами, проектированием и изготовлением макетных образцов модернизированных узлов гравиметра с последующим проведением их испытаний, наиболее важные результаты которых представлены в настоящей статье.

Уменьшение влияния магнитного поля магниторазрядного насоса на свободно падающее тело гравиметра типа ГАБЛ/ГБЛ

В абсолютных гравиметрах типа ГАБЛ/ГБЛ используются магниторазрядные насосы для получения высокого вакуума в камере, в которой движется свободно падающее тело (СПТ). Во всех магниторазрядных насосах, установлены сильные постоянные магниты. То есть такие насосы сами по себе являются источниками сильных магнитных полей. При этом на корпусе СПТ установлена ферритовая пластина, необходимая для захвата СПТ в стартовом положении с помощью электромагнита. На рис. 1 изображены схематически вакуумная камера баллистического блока (ББ), СПТ, магниторазрядный насос (МРН) и силовые линии магнитного поля, создаваемые постоянными магнитами МРН.

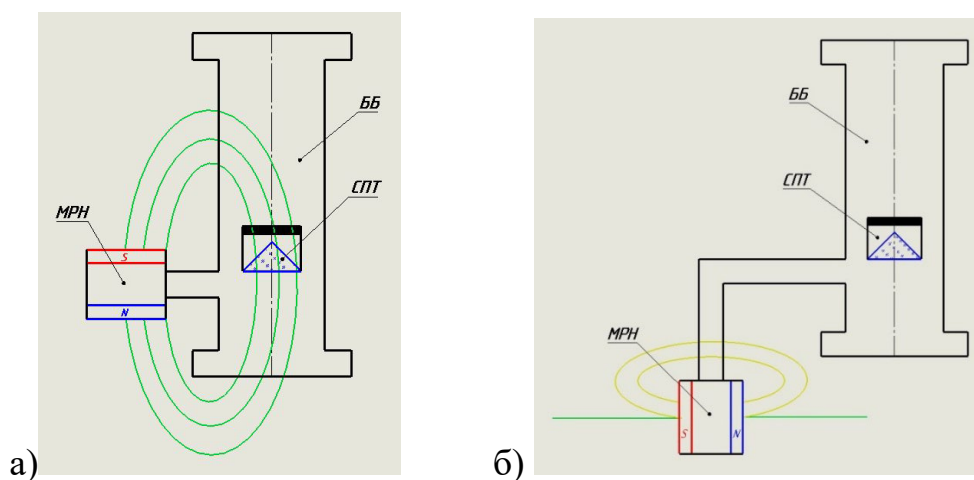


Рис. 1. а) силовые линии магнитного поля, создаваемого магниторазрядным насосом; б) альтернативное расположение магниторазрядного относительно баллистического блока абсолютного гравиметра.

Из рис. 1(а) наглядно видно, как магнитное поле МРН влияет на движение СПТ, создавая систематическую ошибку в определениях абсолютного значения ускорения силы тяжести. Для исключения влияния магнитного поля МРН в гравиметрах типа ГБЛ/ГАБЛ вокруг насоса устанавливается экран из магнитомягкого материала (пермаллой марки 79НМ).

Многолетние исследования остаточных магнитных влияний показали, что полностью исключить неучтенную систематическую ошибку в гравиметрах не удалось. В настоящее время эта ошибка составляет порядка ± 5 мкГал. Неопределенность такой ошибки связана с невозможностью одинаково и достаточно эффективно экранировать магнитное поле насоса.

Решением этой проблемы стало альтернативное расположение МРН относительно баллистического блока гравиметра, а именно удаленность насоса от траектории движения СПТ и продольная его установка, чтобы основные силовые линии располагались перпендикулярно траектории движения СПТ. Для этого был изготовлен специальный (дополнительный) Г-образный патрубок (рис. 1(б)).

Во время испытаний было проведено 6 сеансов высокоточных определений абсолютного значения ускорения силы тяжести, состоящих из 16 серий по 100 единичных бросков: 3 сеанса с магнитным экраном и 3 сеанса – без. Среднеквадратическая ошибка измерений каждого сеанса не превышала 1,5 мкГал. Кроме того, каждый сеанс проводился в разные дни с полным процессом подготовки прибора к измерениям для организации их независимости.

Абсолютный разброс значений ускорения свободного падения силы тяжести не превысил 3 мкГал.

Реализация автоматического определения высоты гравиметра

Одним из важных процессов при подготовке абсолютного гравиметра является определение высоты гравиметра. В гравиметре ГБЛ-М этот процесс заключался в измерении ручной рулеткой от нижней части верхнего фланца трубы баллистического блока до верхней плиты блока интерферометра (основного блока); затем – от верхней плиты до плоскости фундамента гравиметрического пункта. После определения высоты гравиметра, оператор вводил значение вручную в соответствующее поле ввода параметров сеанса измерений. В таком случае точность определения высоты составляет в идеальных условиях ± 3 мм (а то и хуже), что соответствует ошибке в определении абсолютного значения гравиметром, примерно, $\pm 0,9$ мкГал.

Для реализации автоматического определения высоты гравиметра был выбран датчик расстояния VL53L1X с лазерным ToF-модулем с диапазоном до 400 см и точностью единичного измерения ± 20 мм, основанный на методе измерения времени полета (Time-of-Flight): датчик генерирует короткий невидимый инфракрасный лазерный импульс (940 нм), который отражается от цели и возвращается к приемнику.

В бесконечном цикле программа периодически опрашивает датчик на наличие готовых результатов измерения. Если данные доступны, она извлекает сырое значение расстояния от измерительного пункта до нижней плиты гравиметра (до датчика). Полученное расстояние корректируется путем добавления константы коррекции.

Для повышения надежности данных предусмотрена опциональная фильтрация: простое усреднение нескольких последовательных измерений (например, по 10 сэмплам), что сглаживает шум от вибраций или неровностей поверхности

и снижает погрешность до ± 1 мм. Если измерение признано невалидным (например, из-за отсутствия отражения или превышения диапазона), программа пропускает его, избегая ложных значений.

Модернизированная система выставления гравиметра по вертикали

Выставление гравиметров ГАБЛ/ГБЛ по вертикали происходит по регистрации движения блика измерительного луча в поле визуализатора в оптической схеме интерферометра (рис. 2) [13,16]

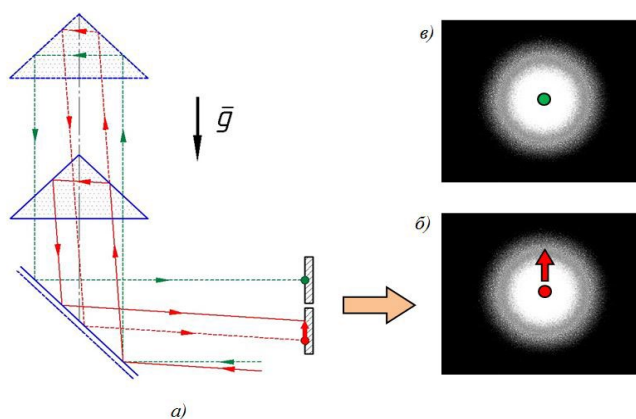


Рис. 2. а) ход лучей в оптической схеме интерферометра гравиметров ГАБЛ/ГБЛ, а также изображение блика на визуализаторе:

- б) при отклонении измерительного луча от вертикали (блик движется),
- в) при совпадении (блик не движется)

На данный момент в качестве визуализатора применяются скоростные видеокамеры с ПЗС-матрицами (60-90 FPS), которые имеют определенный ряд технологических недостатков:

- а) на активном участке пути для обработки имеется 15-20 кадров;
- б) ошибка в определении траектории движения блика при возникновении паразитных лучей;
- в) проблемы с драйверами при переходе на другие операционные системы;
- г) сложный алгоритм определения последнего кадра (момент попадания тела в улавливающее устройство).

Ранее была разработана модернизированная система выставления абсолютного гравиметра по вертикали на основе 4х-элементного радиально-секторного р-і-п фотодиода (4х-квадранта) отечественного производства ФДКН-14.

Данная система обладает рядом преимуществ, среди которых:

- а) количество данных на активном участке пути для обработки не меньше 110, что позволяет более точно построить полином 2-й степени;
- б) отсутствие влияния паразитного излучения (интенсивность сильно меньше интенсивности блика);

в) в виду отсутствия задержки старта записи сложный алгоритм определения последнего кадра не требуется, что упрощает реализацию автоматического выставления гравиметра по вертикали и не требует контроля оператором;

г) драйверы для устройства не требуются.

Проведены испытания модернизированной системы выставления вертикали с новым устройством, которое было установлено в интерферометр абсолютного гравиметра. Сравнительные измерения абсолютного значения ускорения силы тяжести проводились с выставлением вертикали старой и обновленной системами. Чтобы исключить возможные сезонные вариации значений ускорения силы тяжести (УСТ), были проведены 3 группы измерений, в каждую из которых входило по 3 сеанса независимых измерений со старой и 3 сеанса обновленной системами выставления гравиметра по вертикали. Каждый сеанс включал в себя 16 серий измерений по 100 единичных бросков.

Результаты измерений абсолютного значения УСТ, а также среднее значение УСТ, со старой и обновленной системами выставления гравиметра по вертикали приведены на рис. 3.

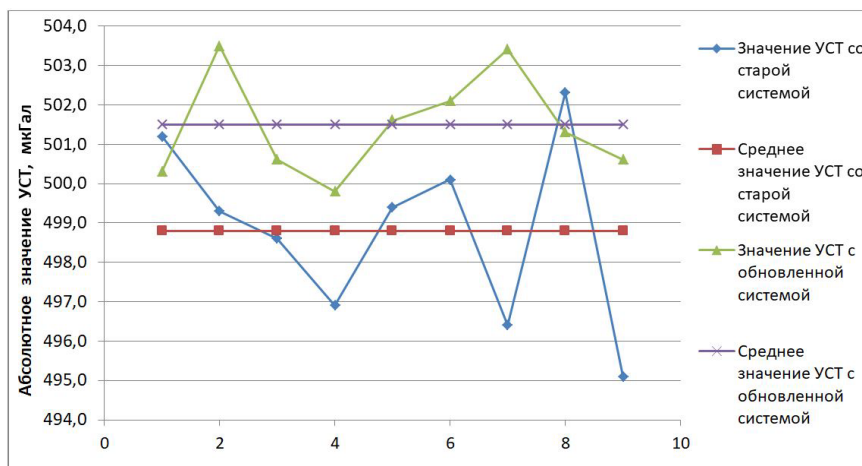


Рис. 3. Результаты измерений абсолютного значения УСТ со старой и обновленной системами выставления гравиметра по вертикали

Из рис. 3 видно, что среднее значение УСТ с обновленной системой больше, примерно, на 2,6 мкГал, чем со старой.

Самопритяжение гравиметра

До недавнего времени влияния самопритяжения гравиметров не учитывалось и считалась незначительной в пределах точности приборов. В настоящее время зарубежные ученые провели расчеты поправки за самопритяжение гравиметров MPG-2, FG5, FG5-238, IMG-02 и выяснили, что она составляет порядка 1 мкГал [17,18]. До недавнего времени в отечественных приборах эта поправка отсутствовала.

Для определения влияния эффекта самопритяжения (гравитационной нагрузки) были выбраны те элементы и узлы гравиметра типа ГАБЛ/ГБЛ, которые находятся

в непосредственной близости от траектории движения свободно падающего тела и обладают достаточно большими массами. Модель гравиметра, взятая для расчета гравитационной нагрузки выбранных элементов на падающее тело, представлена на рис. 4.

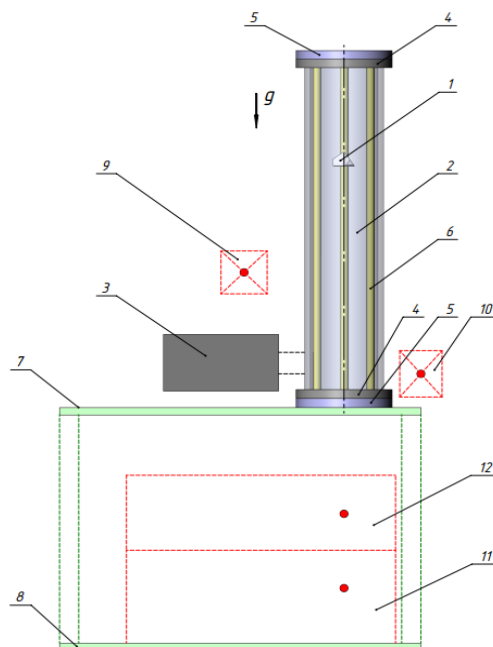


Рис. 4. Модель абсолютного гравиметра типа ГАБЛ/ГБЛ для расчета гравитационной нагрузки

На рис. 4 представлены: (1) – свободно падающее тело, (2) – труба вакуумной камеры баллистического блока, (3) – магниторазрядный насос, (4) – кольцеобразные фланцы, (5) – глухие фланцы, (6) – направляющие системы доставки падающего тела в стартовое положение, (7) – верхняя плита основного блока (блока интерферометра), (8) – нижняя плита гравиметра (основание гравиметра), (9) – вакуумный вентиль, (10) – привод вакуумного ввода системы доставки свободно падающего тела, (11) – блок виброзащиты, (12) – оптический блок интерферометра.

Красными точками на рис. 4 помечены центры масс тех элементов, для которых расчет гравитационной нагрузки производился как для материальных точек, в виду относительно малых масс при небольшом объеме тела, а также тел, которые достаточно далеко расположены от траектории движения СПТ. Расчет непосредственно массы и центра масс этих элементов проводился по созданным моделям в системе трехмерного проектирования Компас.

Расчет гравитационных нагрузок производился методом интегрирования гравитационной силы по пути свободного падения тела, а затем по времени для узлов: цилиндрической формы, формы параллелепипеда, материальных точек [19].

Расчеты гравитационной нагрузки для модели абсолютного гравиметра типа ГАБЛ/ГБЛ:

а) 1,94 мкГал в случае, когда оптический блок оптического стандарта частоты (ОСЧ) находится в стороне гравиметра (расчёт данной конфигурации происходил в виду частого выноса оптического блока ОСЧ оператором во избежание самонагрева при длительных работах);

б) 2,14 мкГал в случае, когда оптический блок ОСЧ находится внутри гравиметра.

Заключение

Испытания показали, что описанное в статье альтернативное расположение магнитоэлектрического насоса относительно баллистического блока гравиметра исключает влияние магнитного поля насоса на движение свободно падающего тела.

Разработанная система автоматического определения высоты гравиметра с использованием лазерных датчиков позволяет достичь точности определения высоты гравиметра ± 1 мм в реальном времени (при этом ошибка в определении абсолютного значения ускорения силы тяжести не превышает $\pm 0,3$ мкГал).

Отклонение вертикали измерительного луча абсолютных гравиметров от отвесной линии в любом направлении всегда приводит к уменьшению абсолютного значения ускорения силы тяжести. Среднее значение ускорения силы тяжести со старой системой меньше (примерно, на 2,6 мкГал), чем с обновленной. Соответственно выставление измерительного луча по вертикали в абсолютных гравиметрах с помощью модернизированной системы является более точной.

Расчёт гравитационной нагрузки для модели гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ показал, что её величина соразмерна точности приборов. Поправка за самопритяжение внесена в перечень неопределенностей для повышения метрологических характеристик гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Башкирцева Н.Ю., Куряшов Д.А., Фирсин А.А. Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений: учеб. пособие. – Казань. : КНИТУ, 2020. – 84 с.
2. Серeda, Н. Г. Основы нефтяного и газового дела / Н. Г. Серeda, В. М. Муравьев. – М.: Недра, 1980. – 287 с.
3. Андреев О.П., Кобылкин Д.Н., Ахмедсафин С.К., Кирсанов С.А., Безматерных Е.Ф., Кривицкий Г.Е. Гравиметрический контроль разработки газовых и газоконденсатных месторождений. Состояние, проблемы, перспективы. – М.: Недра, 2012. – 374 с.
4. Измерение современных движений методами абсолютной гравиметрии и космической геодезии на месторождениях заполярной части Западной Сибири / В.Ю. Тимофеев, Д.Г. Ардюков, Д.А. Носов, И.С. Сизиков, А.В. Тимофеев, Е.В. Бойко, Е.Н. Калиш, Ю.Ф. Стусь // Сейсмические приборы. – 2021. – Т. 57. – № 2. – С. 23-42.
5. Никонов А.А. Современные техногенные движения земной коры // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1976. – № 12. – С. 135-150.
6. Кукол З. Скорость геологических процессов // М.: Мир. – 1987. – 248 с.
7. Сидоров В.А., Кузьмин Ю.О. Современные движения земной коры осадочных бассейнов. М: Наука. – 1989. – 189 с.

8. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. М.: Агентство экономических новостей. – 1999. – 220 с.
9. Адушкин В.В. Тектонические землетрясения техногенного происхождения // Физика Земли. – 2016. – № 2. – С. 22-44.
10. Арнаутов Г.П., Калиш Е.Н., Смирнов М.Г., Стусь Ю.Ф. Лазерный баллистический гравиметр ГАБЛ-М и результаты наблюдений силы тяжести // Автометрия. 1994. № 3. С. 3-11.
11. Д.А. Носов, И.С. Сизиков. Автоматическое выставление вертикали абсолютного гравиметра методом регистрации смещения измерительного луча. // Сейсмические приборы. – 2021. – Т.57. – №3. С. 41-51.
12. Е.Н. Калиш, Ю.Ф. Стусь, Д.А. Носов, И.С. Сизиков. Юстировка измерительного луча интерферометра по вертикали в баллистическом гравиметре. // Автометрия. 2020. № 3. С. 29-34.
13. Пат. 2498356 РФ. Способ выставления вертикали лазерного луча в баллистическом гравиметре и устройство для его осуществления / Е.Н. Калиш, Ю.Ф. Стусь, Д.А. Носов, И.С. Сизиков. Оpubл. 10.11.2013, Бюл. № 13
14. Стусь, Ю.Ф. Разработка и исследование оптической системы лазерного баллистического гравиметра [Текст]: диссертация ... кандидата технических наук: 01.04.05 / Стусь Юрий Федорович. – Новосибирск, 2002. – 111 с.
15. Д.А. Носов, И.С. Сизиков, А.Ю. Тимиртдинов, И.А. Бунин. Пути модернизации абсолютных гравиметров, применяемых в гравиразведке и мониторинге месторождений. // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2024. – Т.2. – №4. С. 11-19.
16. Д.А. Носов, И.С. Сизиков. Автоматическое выставление вертикали абсолютного гравиметра методом регистрации смещения измерительного луча // Сейсмические приборы. – 2021. – Т.57. – № 3. – С.41-51.
17. Biolcati E. Self-attraction effect and correction on three absolute gravimeters / E. Biolcati, S. Svitlov, A. Germak // Metrologia/ - 2012. – Vol. 49, № 5. – P. 560-566.
18. Niebauer T. M. The self-attraction correction for the FG5X absolute gravity meter / T. M. Niebauer, R. Billson, A. Schiel, D. van Westrum, F.Klopping // Metrologia. – 2011. – Vol. 48, № 3. – P. 225-232.
19. А.С. Ельчин, Д.А. Носов, И.С. Сизиков, И.А. Ощепков, И.И. Меженова. Поправка за самопритяжение абсолютных лазерных баллистических гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ // Сейсмические приборы. 2025. Т. 61. № 2. С. 39-49.

© А. С. Ельчин, И. С. Сизиков, Д. А. Носов, А. Ю. Тимиртдинов, 2026