

Д. А. Носов^{1,2}, И. С. Сизиков^{1,2}, А. Ю. Тимиртдинов^{1,2}, И. А. Бунин^{1,2}*

Пути модернизации абсолютных гравиметров, применяемых в гравиразведке и мониторинге месторождений

¹ Институт автоматизации и электротехники Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Новосибирск,
Российская Федерация

² Публично-правовая компания «Роскадастр», г. Москва,
Российская Федерация
* e-mail: nosov.d.a@list.ru

Аннотация. В работе рассмотрены возможные пути модернизации абсолютных гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ отечественного производства, который активно применяются на территории Российской Федерации в гравиразведке и мониторинге месторождений полезных ископаемых. Представлены основные результаты проведенных исследований в поисках методов усовершенствования различных узлов и систем настройки и контроля гравиметров для достижения целей: улучшить метрологические характеристики приборов и максимально автоматизировать процесс подготовки их к измерениям. Особый интерес представляет собой предлагаемая система отбраковки единичного броска свободно падающего тела в баллистическом блоке, основанная на покадровом анализе изображения блика рабочего луча лазерного интерферометра. Описан один из механических немагнитных способов удержания и отпускания свободно падающего тела в стартовом положении. Рассмотрен путь модернизации оптического стандарта частоты с целью полной автоматизации процесса его стабилизации.

Ключевые слова: абсолютное измерение силы тяжести, лазерный баллистический гравиметр, вариации силы тяжести

D. A. Nosov^{1,2}, I. S. Sizikov^{1,2}, A. Yu. Timirtdinov^{1,2}, I. A. Bunin^{1,2}*

Ways to modernize absolute gravimeters used in gravity exploration and field monitoring

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

² Public law company "Roskadastr", Moscow, Russian Federation
* e-mail: nosov.d.a@list.ru

Abstract. The paper examines possible ways to modernize absolute gravimeters of the GABL/GBL type, produced domestically, which are actively used in the Russian Federation in gravity exploration and monitoring of natural resources. The main results of the research carried out in search of methods for improving various units and systems for setting and monitoring gravimeters to achieve the goals are presented: to improve the metrological characteristics of instruments and to automate as much as possible the process of preparing them for measurements. Of particular interest is the proposed system for rejecting a single throw of a freely falling body in a ballistic unit, based on frame-by-frame analysis of the image of a flare of the working beam of a laser interferometer. One of the mechanical non-magnetic methods of holding and releasing a free-falling body in the starting position is described. The way to modernize the optical frequency standard with the aim of fully automating the process of its stabilization is considered.

Keywords: absolute measurement of gravity, laser ballistic gravimeter, gravity variations

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 гравirazведки 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.

Задачей настоящей работы является исследовать возможные пути модернизации абсолютных гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ с целью улучшения характеристик и автоматизации процесса подготовки прибора к измерениям.

Система отбраковки единичного броска

Разработанный в Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук метод выставления гравиметра по вертикали основан на регистрации видеокамерой траектории смещения блика измерительного луча, отраженного от уголкового отражателя в процессе свободного падения пробного тела, и базируется на двух хорошо известных физических эффектах, а именно: 1) СПТ всегда движется по направлению вертикали и 2) луч, выходящий из уголкового отражателя, всегда параллелен входящему лучу [11, 12, 13]. Из этого следует, что если направление лазерного луча совпадает с вертикалью, то луч, приходящий из уголкового отражателя во время его свободного падения, всегда попадает в одну и ту же точку визуализатора, а если направление лазерного луча не совпадает с вертикалью, то приходящий луч при свободном падении уголкового отражателя отраженный от него луч будет смещаться относительно своего начального положения на визуализаторе (рис. 1).

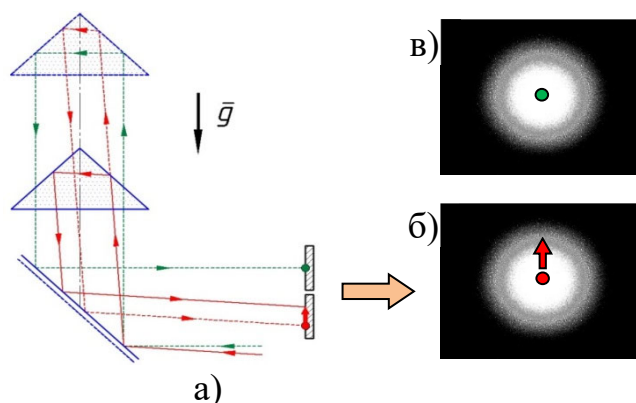


Рис. 1. а) Ход лучей в оптической схеме гравиметра типа ГАБЛ/ГБЛ и изображение блика измерительного луча на визуализаторе: б) при отклонении измерительного луча от вертикали и в) их совпадении

СПТ движется в баллистическом блоке гравиметра равноускоренно в поле силы тяжести, соответственно, уравнение движения блика в процессе падения можно записать в виде

$$\bar{r} = \bar{r}_0 + \bar{v}_0 t + \frac{\bar{g} t^2}{2}. \quad (1)$$

Приняв центр блика начального кадра за начало отсчета системы координат и предположив, что начальная скорость \bar{v}_0 равна нулю (в стартовом положении тело зафиксировано), уравнение (1) преобразуется в

$$\bar{r} = \frac{\bar{g} t^2}{2}. \quad (2)$$

Но перемещение блика может быть связано не только с движением СПТ в поле силы тяжести, а также с импульсом, получаемым при отрыве пробного тела, связанным с силой реакции опоры, причинами которой являются: сила электромагнита, удерживающего в начальном положении падающее тело, и неустойчивость гравиметрических измерительных пунктов, расположенных в зонах с повышенной сейсмоактивностью (как естественной, так и техногенной). Соответственно, линейная часть уравнения $\bar{v}_0 t$ далеко не всегда равна нулю. Сильные боковые импульсы являются причиной:

- расхождения опорного и измерительного лучей (вследствие горизонтального СПТ);
- возникновения вращения СПТ;
- ошибки в выставлении измерительного луча по вертикали.

Все это приводит к увеличению погрешности при определении значения ускорения свободного падения. Поэтому возникает необходимость проводить покадровый анализ каждого броска.

Определив центр блика, специальная программа записывает его координаты. Затем, во время падения, фиксируется изменение координат центра в виде массива данных $[X_i, Y_i]$. По этому массиву строится кривая зависимости координаты от времени, уравнение которой является полиномом 2-го порядка

$$P_2(x, y) = P^1(x, y) + P^2(x, y), \quad (3)$$

где $P^1(x, y)$ – линейный член, который соответствует вышеописанному боковому импульсу;

$P^2(x, y)$ – квадратичный член, который соответствует влиянию силы тяжести.

Для корректного выставления вертикали из полинома (3) необходимо исключить линейную часть и рассматривать только квадратичную. По полученному таким образом полиному (4) строится новая кривая и определяется степень отклонения блика

$$P_2(x, y) = P^2(x, y). \quad (4)$$

Сравнив координаты центра блика начального и конечного кадров, программа определяет величину и направление смещения блика.

Аналогичным образом, исключив квадратичную часть из полинома (3), программа определяет величину горизонтального смещения тела в процессе падения, а соответственно, и силу бокового импульса.

Итак, в процессе анализа получается всего три параметра, которые характеризуют качественно каждый единичный бросок:

- величина горизонтального смещения СПТ в процессе падения;
- величина отклонения от вертикали измерительного луча;
- и суммарное смещение.

Задав определенные критерии (допустимые значения величин смещений блика) по этим трем параметрам, программа проводит отбраковку бросков, разделив их на «хорошие» и «плохие», и, сгруппировав в новые массивы только «хорошие», пересчитывает значение ускорения свободного падения.

Модернизация системы выставления по вертикали

В качестве визуализатора в абсолютных гравиметрах типа ГАБЛ/ГБЛ используется ПЗС-матрица в веб-камере с частотой записью 60 кадров в секунду. При этом за время движения СПТ в баллистическом блоке формируется не более 12 активных кадров для анализа перемещения блика и построения полинома 2-го порядка (3). Кроме того, в поле ПЗС-матрицы иногда может попадать паразитный луч, который, не смотря на его малую интенсивность, вносит существенную дополнительную ошибку.

С целью модернизации системы выставления по вертикали гравиметров предлагается заменить веб-камеру на устройство для анализа перемещения блика рабочего луча на основе кремниевого четырехэлементного радиально-секторного *p-i-n* фотодиода (4-хсекторный фотоприемник). Снимок прототипа такого устройства показан на рисунке 2.

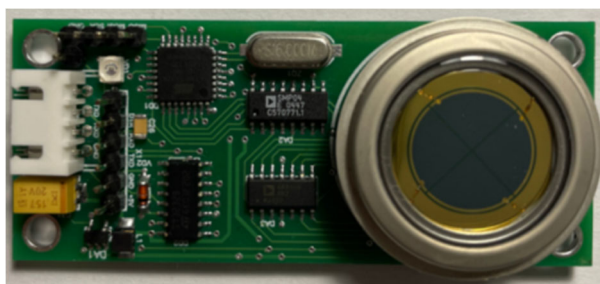


Рис. 2. Прототип устройства для анализа перемещения блика рабочего луча на основе кремниевого четырехэлементного радиально-секторного *p-i-n* фотодиода

К преимуществам данного устройства относятся:

- не менее 120 определений положения блика рабочего луча за время броска (порядка 200 мс);
- не чувствителен к паразитным лучам интерферометра;

- вследствие мгновенного запуска сбора и записи данных не требуется алгоритм для определения кадра попадания СПТ в улавливающее устройство баллистического блока.

Немагнитный захват СПТ

На корпусе СПТ установлена пластина, выполненная из ферритового материала, с помощью которой электромагнитом производится захват СПТ в стартовом положении. При свободном падении пробная масса движется с ускорением в магнитном (неравномерном) поле, которое складывается из магнитного поля Земли и других источников поля таких как: узлы гравиметра (магниторазрядный насос, вакуумный ввод вращения, магнит оптического блока ОСЧ и т.д.), различные электромагнитные установки, расположенные вблизи гравиметра и т.д. Магнитная обстановка на траектории падения СПТ сильно сложна и может меняться как со временем, так и от места к месту проведения измерений. Задача измерить или рассчитать магнитное поле и внести соответствующие поправки является невозможной.

Кроме того, не получается одинаково экранировать поле, например, излучаемое сильным постоянным магнитом ионного насоса. Практика показывает, что разброс значения ускорения свободного падения на одном пункте разных гравиметров достигает ± 15 мкГал.

В процессе проведения исследований по уменьшению неучтенной систематической ошибки, связанной с влиянием магнитного поля на измерения абсолютных гравиметров, были рассмотрены различные способы немагнитного захвата СПТ в стартовом положении. У всех рассмотренных принципов захвата возникает проблема плавного отпускания СПТ. При сбросе СПТ с большой вероятностью будет возникать вращение (связано с силами реакции опор при удерживании), которое вносит дополнительную систематическую ошибку.

В результате проведенных исследований предлагается рассмотреть следующую идею захвата и отпускания СПТ в баллистических гравиметрах.

Вместо ферритовой пластины на корпусе СПТ (рис. 3а) устанавливается хорошо полированная ось, выполненная, например, из нержавеющей стали (рис. 3б).

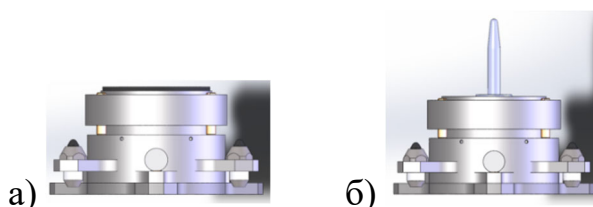


Рис. 3. Изменение в конструкции свободно падающего тела

На систему доставки СПТ (каретку) устанавливается цилиндрический корпус с вставкой, выполненной из относительно мягкого материала (например, фторопласт, капрон). В начале цикла единичного броска каретка расположена

так, что ось СПТ находится внутри корпуса каретки и прижимается вставкой (желтого цвета), как показано на рисунке 4.

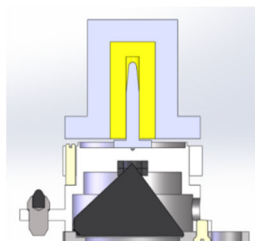


Рис. 4. Механический немагнитный захват СПТ

Каретка с захваченным за счет сил трения СПТ движется вверх к стартовому положению, пока иглы СПТ не коснутся опорные чашки, расположенные на верхнем фланце баллистического блока (рис. 5а). Продолжая плавно движение, каретка с цилиндрическим корпусом захвата постепенно освобождает СПТ (рис. 5б). Происходит постепенное уменьшение площади соприкосновения оси и вставки, а соответственно и удерживающих сил, до тех пор, пока СПТ не начинает свободное падение (рис. 5в).

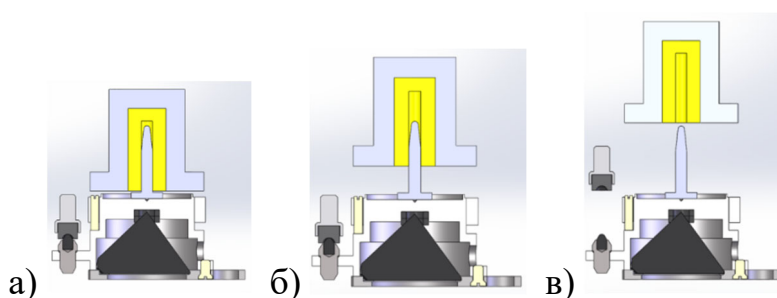


Рис. 5. Система немагнитного захвата и отпуска СПТ в баллистических гравиметрах

Автоматическая стабилизация оптического стандарта частоты

Оптический стандарт частоты (длины), используемый в настоящее время в гравиметрах типа ГАБЛ/ГБЛ, имеет ряд недостатков для использования в полевых условиях. Основным недостатком является сложность в эксплуатации. Стандартом может пользоваться только оператор со специальным образованием, также знающим конструкцию как оптического, так и электронного блока стандарта частоты. Он должен понимать диаграммы спектров, выводящихся на экран монитора, уметь выбирать подходящую компоненту линии поглощения, перестраивать туда частоту лазера и осуществлять переход стандарта в режим стабилизации по реперному резонансу [15]. Из недостатков настоящей конструкции можно выделить:

- для работы оператора со стандартом необходим компьютер со специальным управляющим программным обеспечением;
- оператор должен уметь распознавать правильную линию поглощения молекулярного йода, находить требуемый реперный резонанс на линии поглощения и переводить стандарт в режим стабилизации.

В процессе модернизации абсолютных гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ предлагается встроить в управляющую электронику миникомпьютер типа *RaspberryPi* с операционной системой *Linux* для реализации алгоритмов автоматической стабилизации стандарта за резонанс, исключив, таким образом, полностью роль оператора.

Заключение

В работе представлены основные результаты проведенных исследований в поисках методов усовершенствования различных узлов и систем настройки и контроля абсолютных гравиметров типа ГАБЛ/ГБЛ для достижения целей: улучшить метрологические характеристики приборов и максимально автоматизировать процесс подготовки их к измерениям.

Описанный в работе метод отбраковки единичного броска СПТ в баллистическом блоке должен привести к уменьшению среднеквадратической ошибки или сократить существенно время проведения измерений абсолютного значения силы тяжести.

Рассмотренный новый способ немагнитного захвата СПТ в стартовом положении позволит исключить влияние внешнего магнитного поля и, тем самым, уменьшить неопределенную систематическую ошибку абсолютных гравиметров.

Представленный в работе путь модернизации оптического стандарта частоты позволит полностью автоматизировать процесс стабилизации, исключив роль операторов, работающих с абсолютными гравиметрами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Башкирцева Н.Ю., Курышов 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. Опубл. 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. Применение ND:YAG-лазера в качестве оптического стандарта длины в баллистическом гравиметре / Е.Н. Калиш [и др.] // Гео-Сибирь. – 2006. – Т. 4. – С. 48-52.

© Д. А. Носов, И. С. Сизиков, А. Ю. Тимиртдинов, И. А. Бунин, 2024