

УДК 621.317

О.М. Безвесільна, д.т.н., А.А. Остапчук, к.т.н.
Є.В. Гура, аспірант**ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТА АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ БАЛІСТИЧНОЇ
ГРАВІМЕТРІЇ**

Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут»

*Узагальнено характеристики сучасних балістичних гравіметрів, а також проаналізовано історичні етапи становлення балістичної гравіметрії***Ключові слова:** балістичний лазерний гравіметр, гравітаційне прискорення**Вступ**

Важливість гравіметричних вимірювань для наукових і практичних цілей обумовлена тим, що всі процеси на Землі проходять в умовах дії гравітації. Гравіметрія, як галузь науки, почала розвиватись з 50х років XX сторіччя. У відомій літературі [1] описано лише деякі розрізнені відомості, а чітких узагальнених характеристик існуючих типів гравіметрів досі немає. Тому аналіз сучасного стану балістичної гравіметрії є актуальним.

Мета статті – надати аналіз сучасного балістичної гравіметрії.

Основний матеріал статті. Поле сили тяжіння Землі утворено взаємодією гравітаційної і, враховуючи її обертання навколо вісі, доцентрової сили.

Особливість значення прискорення сили тяжіння (ПСТ) як вимірюваної фізичної величини, полягає у тому, що діапазон її варіацій на земній поверхні невеликий і складає від 978 до 983 Гл (1 Гл=1 см/с²), тобто всього близько 0,5 %, у той час, як корисну інформацію часто необхідно отримувати у просторово-часових варіаціях ПСТ величиною до 1мкГл, що у відносному виразі складає всього $1 \cdot 10^{-7}$ %.

Нормальне поле сили тяжіння може бути розраховано теоретично, однак, цілий ряд факторів вносить суттєві зміни у теоретичну модель гравітаційного поля. Наприклад, аномалії структури земної кори вносять зміни відносно теоретичної моделі до $\pm 3 \cdot 10^{-2}$ % з середнім квадратичним відхиленням $\pm 3 \cdot 10^{-3}$ %. Впродовж року локальне значення ПСТ може змінюватись на $1 \cdot 10^{-5}$ % і більше, внаслідок прояву неконтрольованих геодинамічних явищ, варіацій рівня ґрунтових вод і сніжного покриву, віддаленого землетрусу, переміщення мас у результаті діяльності людини та інш. Тому використання таблиць чи розрахункових формул, в яких необхідне абсолютне значення ПСТ з похибками, меншими $3 \cdot 10^{-3}$ %, є некоректним.

Потрібно зазначити термінологічні розголоси у метрології і гравіметрії. Термін «нормальне» значення ПСТ у метрології (константа, що дорівнює 9.80665 м/с²) не відповідає поняттю «нормальне» значення ПСТ у гравіметрії, де під ним розуміють значення ПСТ на поверхні «нормального» еліпсоїда обертання, яке залежить від широти пункту спостереження. Таким чином, у багатьох випадках для визначення значень ПСТ в даному місці і в даний момент часу необхідно виконати вимірювання абсолютних значень ПСТ.

Та чи інша інтерпретація результатів вимірювань ПСТ визначає область застосування і вимоги до точності гравіметричних даних. Абсолютне значення ПСТ або його варіацій у метрології має бути відоме у зв'язку з необхідністю відтворення і передачі одиниці стандартної сили – Ньютона.

З'явилися повідомлення про новий метод визначення гравітаційної сталої за допомогою балістичного гравіметра, де спостерігається зміна ПСТ у результаті гравітаційної взаємодії вільно падаючої маси із зовнішньою гравітаційною масою. Такі фундаментальні проблеми потребують знання ПСТ з похибкою $1 \cdot 10^{-9}$ % та менше.

У геодезії гравіметричні дані використовуються для уточнення фігури Землі, її розмірів та вимірювань параметрів гравітаційного поля, що необхідно для цілей картографії та автономної навігації. Відомо, що успішний запуск космічних об'єктів на навколосезну орбіту залежить від гравіметричних даних у місці старту. Створення моделі гравітаційного поля Землі необхідне для розрахунку траєкторій штучних супутників Землі.

Гравіметричні виміри входять до комплексу геодинамічних спостережень для прогнозу техногенних катастроф. На території України є зони з підвищеною сейсмічною активністю, де

гравіметричні дані можуть бути використані для моніторингу крупних промислових об'єктів (атомних та гідроелектростанцій, підземних газосховищ та інш.).

При сучасній досяжній точності абсолютних визначень ПСТ у 3 мкГл можливо виявляти вертикальне зміщення земної кори з точністю до 1 см, що значно дешевше і точніше відомих геометричних методів, чи з використанням супутникових систем.

Зв'язок структури гравітаційного поля зі структурою земної кори дозволяє використовувати гравіметричну інформацію під час пошуку корисних копалин. Так, для виявлення нафтових та газових покладів необхідно виділяти аномалії ПСТ з точністю 10 мкГл і менше.

Детальні гравіметричні виміри виконуються, як правило, відносними гравіметрами з прив'язкою до опорних гравіметричних пунктів і калібруванням на гравіметричних полігонах. Опорні гравіметричні мережі і полігони створюються абсолютними визначеннями з максимально можливою точністю, так як випадкові похибки окремих пунктів надалі стають систематичними для цілих районів. Сучасні вимоги задають необхідність створення абсолютного пункту з похибкою не більшою 10 мкГл.

У наш час опорна гравіметрична мережа СНД охоплює, в основному, Європейську частину Росії, до того ж, вона не відповідає сучасним міжнародним нормам. Це підтверджує необхідність створення універсального балістичного гравіметра, як для народного господарства, так і для військово-промислового комплексу.

Нові технічні засоби для виміру інтервалів часу, що з'явилися у 50-х р.р. XX сторіччя, створили передумови для розробки балістичних гравіметрів. Такі прилади були створені: у Франції - А. Тулін (Міжнародне Бюро мір і ваг, 1957 р.), у США - Д. Роуз і Д. Вуллард (Вісконсинський університет, 1958 р.); Д. Тейт (Національне Бюро стандартів, 1965 р.), у Канаді - Х. Престоґін Томас, Я. Турнбуль та інш. (фірма Престоґін Томас, 1959 р.), в Англії - А. Кук (Національна фізична лабораторія, 1965 р.), у ФРН - С. Герман (фізико-технічний державний інститут, 1969 р.), у НДР - И. Дитріх і Г. Гарниш (Національна служба метрології, 1970 р.), у Японії - Тойї Кітсунесаки (Інститут мір і ваг, 1971 р.).

Як правило, всі використані прилади були стаціонарними. Похибка виміру абсолютного значення прискорення сили ваги оцінювалася у 0,5 - 2 мГл і обмежувалася, головним чином, помилками вимірювання довжини.

У СРСР розробкою приладів для абсолютних вимірів ПСТ займалися у Всесоюзному науково-дослідному інституті метрології ім. Д. І. Менделєєва. У 1956 р. О. І. Марціняк спостерігав вільне падіння латунного жезла довжиною 1,05 м із двома вставленими в нього кварцовими пластинами, покритими світлочутливим шаром. Спалахи світла тривалістю $3 \cdot 10^{-6}$ с, що відбуваються з однією з частот 250, 125 або 62,5 Гц через вузьку щілину, реєструвалися фото чутливим шаром. Завдяки цьому була можливість реєструвати відрізки пройденого шляху, що проходились за рівні і відомі інтервали часу. Падіння тіла відбувалося при тиску повітря 0,2 мм. рт. ст. Точність визначення прискорення сили тяжіння склала $\pm 2,0$ мГл.

У цьому ж, 1956 р. П. М. Агалецьким і К. М. Єгоровим було створено установку, де реєструвалися сумісне падіння невеличкого падаючої вакуумної камери й вільно падаючого тіла у середині цієї камери. Такий метод спостережень був запропонований Агалецьким ще в 1947 р. і дозволив послабити вимоги до величини тиску повітря у середині вакуумованої камери. Шлях падіння останньої був 14 м. Вільно падаюче тіло являло собою рамку з фотопластинкою. Під час вільного падіння на фотопластинці реєструвалися світлові імпульси із частотою в 62,5 Гц і тривалістю 3-5 мкс, що генерувалися газо світловою лампою. Положення камери визначалося одночасним включенням двох електромагнітних рекордерів, що сковзали по двох сталевих дратах, відзначаючи на останніх моменти спалахів світла. Інструментальна помилка приладу склала $\pm 1,6$ мГл.

Відомі сучасні балістичні гравіметри відрізняються наступним:

а) спостерігається вільне падіння тіл, виконаних у вигляді кутових світло відбивачів, що мають властивість направляти відбитий промінь світла паралельно падаючому;

б) відрізки шляху, прохідні кутовим світло відбивачем, реєструються інтерференційним методом;

в) як джерела світла, використовуються стабілізовані оптичні квантові генератори (ОКГ);

г) як правило, гравіметри транспортабельні.

В 1963 р. Д. Фаллер і Д. Хаммонд у Пристонському університеті США спостерігали вільне падіння світло відбивача, виконаного у вигляді системи лінз і дзеркал. Вимірюваний відрізок шляху падіння рівнявся 5,26 см при всій довжині траєкторії тіла в 10 см. Спостереження

проводилися під тиском повітря у середині камери не більше $4 \cdot 10^{-6}$ мм. рт. ст. В комплект гравіметра був включений сейсмометр. Останнім виміряли вібрації у місці спостережень. Отримані величини дозволяли оцінити вплив вібрацій на результати вимірювань ПСТ. Значення ПСТ обчислювалося за результатами вимірювань інтервалів часу, за які світловідбивач проходить два відрізки шляху, заданих: певним числом інтерференційних смуг. Помилка одиничного вимірювання склала 5 мГл, а середнього з 100 вимірів $\pm 0,7$ мГл.

В 1968 р. цими ж дослідниками у лабораторії Веслеєнського університету спостерігалось вільне падіння кутового світло відбивача при тиску повітря в $5 \cdot 10^{-7}$ мм. рт. ст. з висоти 1 м. Референтний кутовий світло відбивач у цьому гравіметрі був встановлений в центрі хитання маятника сейсмометра. Це дозволило послабити вплив вібрацій на результати вимірювань. Довжина хвилі випромінювання квантового генератора визначалася з похибкою $5 \cdot 10^{-8}$ по відношенню до довжини хвилі помаранчевої лінії, випромінюваної ізотопом $^{86}\text{Kг}$. Інструментальна точність приладу за результатами спостережень на восьми пунктах у 1971 р. лежала в інтервалі 0,041-0,087 мГл. Тривалість вимірювання на пункті, включаючи установку кута розбирання приладу, склала 5 діб.

В 1970 р. під керівництвом доктора Дж. Хаммонда був створений прилад Геодезичної лабораторії Військово-Повітряних сил США (AFGL). Наступна модель (JILA), розроблена в інституті експериментальної астрофізики доктором М.Замбергом і доктором Ринкером містила активну віброзахисну систему, так названу «супер пружину» з періодом власних коливань до 60 с і спеціальну конструкцію для усунення залишкового тиску повітря у вакуумній камері для чого пробна маса з кутовим оптичним відбивачем була розміщена у додатковій невеликій камері, що рухалася разом із пробною масою. Потім, в інституті океанографії США доктор М. Замберг розробив балістичний гравіметр із цифровою обробкою сигналу інтерференції (OBAGM) для виміру ПСТ на дні морів й океанів.

В 1970 р. М. Гюкомба з лабораторії фірми Томсон-CSF (Франція) спостерігав вільне падіння кутового світло відбивача у камері під тиском повітря $1 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст. В процесі спостережень вимірювався час проходження світло відбивачем двох відомих відстаней (до 0,01 інтерференційної смуги) в 500000 і 1500000 інтерференційних смуг. У приладі не застосовувалися жодні засоби захисту, спрямовані на ослаблення впливів вібрацій. Це головним чином визначало інструментальну точність приладу в 0,3 мГл.

У Міжнародному Бюро мір і ваг (Франція) в 70-х роках працювала установка, створена під керівництвом А. Сакуми. Ця стаціонарна установка складалась з двох камер з'єднаних Т-подібно. У вертикальній камері, вагою 650 кг і висотою 2,8 м, при тиску повітря 10^{-7} - 10^{-3} мм.рт.ст. вертикально вгору підкидався 430 г кутовий світло відбивач. Вимірювались інтервали часу, за які цей світло відбивач проходив ту саме відстань як нагору, так і вниз. У приладі застосована складна система захисту інтерферометра від впливу вібрацій. Значення сили ваги обчислювалося як середнє з ряду, що включав 5 - 50 вимірів. Інструментальна точність приладу становила 70 мГл.

У 1972 р. у Національній лабораторії стандартів Австралії Г. Белл, Д. Гіббєнс і Д. Паттерсон працювали з установкою, подібною до приладу А. Сакуми. Спостерігалось симетричне падіння 1160 г кутового світло відбивача у вакуумній камері, де тиск повітря становив $1 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст. Точність вимірів прискорення сили тяжіння з 190 визначень оцінювалася в $\pm 0,2$ мГл.

В 1976 р. об'єднаними зусиллями Інституту метрології Дж. Колонетти (Італія) і Міжнародного Бюро мір і ваг (Франція) був створений балістичний гравіметр, у якому спостерігалось симетричне падіння кутового світло відбивача (Л. Комізо, Дж. Серутті, А. Сакума й інш.). Вимірювався час, за який кутовий світло відбивач проходить рівні і симетричні щодо вершини відрізки шляхи відповідно на висхідній і спадній частинах траєкторії. Спостереження проводилися під тиском повітря $1 \cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст. Помилка вимірюного ПСТ склала 10 мГл. Така точність вимірювань досягалась головним чином за рахунок наступного: зупинка референтного кутового світло відбивача у центрі хитання сейсмометра для ослаблення впливу вібрацій; застосування оптичного квантового генератора, стабілізованого по йодному осередку поглинання, що знижувало помилку відтворюваності і стабільності довжини хвилі оптичного квантового генератора.

Час спостереження становив 3-4 дні.

На базі цього приладу авіаційною французькою фірмою «JAEGER» разом з Міжнародним Бюро мір і ваг було розроблено серійний зразок балістичного гравіметра, що отримав цифр GA-60. Протягом 1980 - 1981 р. р. було виготовлено два екземпляри перших серійних абсолютних гравіметрів. В 1983 р. один з них був використаний для визначення п'яти нових пунктів

французької Національної гравіметричної мережі. Максимальна систематична помилка гравіметра GA-60 за дослідженнями авторів не повинна перевищувала $3 \cdot 10^{-9}$.

На початку 1980х р.р. у Японії, у Дослідницькому інституті землетрусів, І. Мурато спостерігав вільне падіння кутового світло відбивача у вигляді оптичної системи типу «котяче око» діаметром 20 мм і висотою 33 мм. Вимірюваний за допомогою інтерференції лазерного випромінювання відрізок шляху становив 30 см. Реєстрація інтерференційних смуг і міток часу здійснювалась фотографічним способом. Значення сили ваги, отримане даним приладом, характеризувалось помилкою $\pm 0,04$ мГл.

В 1982 р. в Національному інституті метрології Китайської народної республіки було побудовано балістичний гравіметр (Юнг-Юан). Спостерігалось несиметричне падіння кутового світло відбивача методом трьох станцій. Спостереження проводилися серіями по 16-26 падінь. Середня квадратична помилка однієї серії 70 мГл. Точність остаточного результату складала від 13 до 25 мГл.

В 1982 р. у США було створено ще один гравіметр, збудований на спостереженнях спільного падіння двох тіл. І. Зумбергом спостерігалось вільне падіння кутового світло відбивача протягом 20 см падаючої камери, за якою велось спостереження. Цей метод спостережень дозволив проводити виміри під тиском повітря до 10^3 мм. рт. ст. Реєстрація переміщень кутового світло відбивача здійснювалась методом лазерної інтерференції. Використання оптичного квантового генератора, стабілізованого по йодному осередку поглинання, для визначення довжини хвилі робочого оптичного квантового генератора й захисних засобів від впливу вібрацій забезпечили похибку виміру 10 мГл. Наступне покоління являло собою серію з 6 приладів (JLA-1 - JLA-6), які були придбані різними організаціями США, Канади, Німеччини, Фінляндії й Австрії. Нарешті, спільними зусиллями ряду наукових організацій, державного та приватного капіталу США створена комерційна модель – балістичний лазерний гравіметр FG-5, що з 1993 року випускається серійно фірмою Micro-g Solution Inc. Необхідно відзначити, що всі гравіметри, розроблені школою проф. Дж. Фаллера, реалізовані по несиметричному способу.

В СРСР, з 1972 р. працював прилад, де спостерігали несиметричне падіння 90 г кутового світло відбивача (інститут автоматики й електротехніки АН СРСР. Арнаутов Г. П., Гік Л. Д., Калиш Є. Н., Коронкевич В. П., Малишев І. С., Нестирихін Ю. Є., Стусь Ю. Ф., Тарасов Г. Г., Тарасюк В. Г.). Спостерігалось два інтервали часу, за які кутовий світло відбивач, падаючи, проходив відповідні відрізки шляху. Вільне падіння відбувалось при тиску повітря в 10^{-6} мм. рт. ст. Спостереження проводилися протягом 30 хвилин. За цей час робилося 100 вимірів (масив). Таких масивів на пункті робилося порядку 10-20. Для ослаблення впливу вібрацій використався сейсмометр. Довжина хвилі випромінювання робочого оптичного квантового генератора постійно контролювалась по довжині хвилі оптичного квантового генератора, стабілізованого по йодному осередку поглинання. Вимір гравіметром абсолютного значення ПСТ із середньою квадратичною помилкою в 10-15 мГл. По внутрішній збіжності похибка вимірів $3...7$ мГл.

З 1973 р. в Харківському державному науково-дослідному інституті метрології велися роботи зі створення приладу, де також спостерігалось несиметричне падіння кутового світло відбивача (Безрідний В.В., Дударчик В.Н., Красовский В.Д.). У 1982 р. були виготовлені нові більш досконалі варіанти балістичного блоку та лазерного інтерферометра. У комплект гравіметра включено створений в інституті контрольний оптичний квантовий генератор, стабілізований по йодному осередку поглинання. З 1975 р. в цьому ж інституті велися роботи зі створення балістичного гравіметра з симетричним падінням кутового світло відбивача.

В інституті було сформовано три напрямки: метрологічне (створення перевірочної установки вищої точності), наземна балістична гравіметрія спеціального призначення та балістична гравіметрія для вимірювання на рухомій платформі (корабель, підводний човен та інш.). Використовуючи закордонний і свій власний досвід, шляхом аналізу метрологічних, технічних й експлуатаційних вимог до апаратури, в якості базової моделі для наступних досліджень прийнято гравіметр з симетричним способом вимірювання.

У результаті більш ніж 20-річної роботи, створено невелику серію моделей БЛГ. У 1995 р. для України створено і затверджено спеціальний еталон прискорення вільного падіння.

Актуальність рішення завдання по уніфікації гравіметричної мережі з міжнародною опорною мережею дозволяє забезпечити єдність деяких видів вимірювань у країнах Євро Азійського континенту, створити єдину систему висот, уточнити форму геоїда та інш. Так, наприклад, у рамках програм Центральної Європейської Ініціативи (CEI) з 1998 року виконуються роботи по проекту «Уніфікація гравіметричних мереж у Центральній і Східній Європі» (UNIGRACE).

У 90х р.р. XX сторіччя з'явилися так звані лазерні балістичні гравіметри. Загальну схему такого гравіметра наведено на рис. 1.

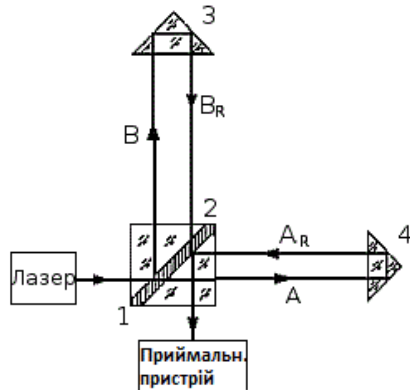


Рис. 1. Оптична схема лазерного балістичного гравіметра

У свою чергу пучок В, відбиваючись від вільно падаючої призми 3, повертається назад по шляху B_R і також попадає на вхід приймального пристрою, де співпадає з пучком A_R . Через рух призми 3, світлі і темні смуги інтерференційної картини переміщуються, і приймальний пристрій реєструє імпульси, які використовуються для визначення абсолютного значення g .

Шлях, пройдений вільно падаючою призмою 3, визначається числом смуг. Якщо початкова швидкість невідома, то виміри виконують протягом двох тимчасових інтервалів τ_1 і τ_2 , що мають один початок відліку, причому τ_2 вибирають вдвічі більшим, ніж τ_1 . Значення g обчислюють за формулою:

$$g = \frac{2\lambda}{N_1\tau_1 - N_2\tau_2}, \quad (1)$$

де λ - довжина хвилі світла; N_1 і N_2 - число смуг, полічених відповідно за тимчасові інтервали τ_1 й τ_2 .

Для зменшення впливу обертання призми 3 пристрій конструюють таким чином, щоб його центр ваги збігався з оптичним центром. Для виключення впливу тертя повітря призму 3 розташовують у вакуумованій камері, укріпленій на основі, де встановлено лазер, світлоділильну призму 2, прийомний пристрій і нерухому призму 4.

Таблиця 1

Основні порівняльні характеристики БЛГ на нерухомій основі

Метод вимірювання g	Фірма виробник	Апаратура та методи зниження впливу вібрацій	Похибка мір довжини δ_λ і часу δ_t , степінь вакууму P , мм. рт. ст.	Похибка вимірювання g	
				Інструментальна	По внутрішній збіжності
Симетричний	ІФЗ ім. О.Ю. Шмідта Москва	20-секундний сейсмограф	$\delta_\lambda = 2 \cdot 10^{-8}$ $\delta_t = 1 \cdot 10^{-10}$ $P \leq 1 \cdot 10^{-3}$	8 мкГл	8 мкГл (за 10÷20 кидків за 1 рік)
	ВІРМ, Севр, Франція	П'єзо датчики-компенсатори. Демпфування в рідкому маслі, введення поправок за показниками 35-секундний сейсмографа	$\delta_\lambda = 1 \cdot 10^{-9}$ $\delta_t = 1 \cdot 10^{-10}$ $P < 1 \cdot 10^{-7}$	3 мкГл	---
	Міжнародна широтна обсерваторія, Мізусава, Японія	Подвійна система компенсації вібрацій. Вимірювання залишкових вібрацій та введення поправок	$\delta_\lambda = 1 \cdot 10^{-11}$ (за 1 с) $\delta_t = 1 \cdot 10^{-10}$ $P = (1,6 \div 2,8) \cdot 10^{-6}$	8 мкГл	6 мкГл (за 30 кидків)
Несиметричний	НДЦ "Інститут метрології", Харків, Україна	2 зв'язаних пружних вертикальних маятники	$\delta_\lambda = 3 \cdot 10^{-9}$ (за рік) $\delta_t = 1 \cdot 10^{-9}$ (за рік) $P = 5 \cdot 10^{-6}$	10 мкГл	10 мкГл (за 3-м нічних серій)

У деяких типах БЛГ, щоб врахувати вплив рухів земної кори, нерухомий кутовий відбивач монтується на сейсмометрі. В результаті вимірів вводять поправку за висоту, на якій роблять виміри, а також враховують електричні і магнітні сили (зокрема, від котушок сейсмометра), стабільність довжини хвилі випромінювання лазера та номінальну точність виміру часу. Крім того, необхідно враховувати поправку, що враховує доплерівський ефект лазерного випромінювання. Поправка має відносну величину порядку $3 \cdot 10^{-8}$ та може бути обрахована згідно виразу:

$$\Delta g/g = - \left[\frac{3g(\tau_1 + \tau_2)}{c} + 2v_0/c \right], \quad (2)$$

де v_0 - швидкість кутового відбивача в початковий момент вимірів.

Рухомі БЛГ, як правило, комплектують високоточними супутниковими засобами навігації. При виконанні аерографіметричних зйомок використовують також радіолокаційні або лазерні висотоміри.

Сьогодні дослідження в області гравіметрії проводять в Росії у ЦНДІ "Азимут" (м. Санкт-Петербург) та у ВВІАУ ім. Жуковського (м. Москва) і в Латвії у РВ ВІАУ (м. Рига).

Вагомий вклад у розвиток гравіметрії було здійснено радянськими вченими: В.О. Багрянцем, Ю.Д. Буланже, К.Є. Веселовим, А.М. Лозинською, А.А. Михайловим, С.А. Піддубним, Є.І. Поповим, В.А. Туліним, В.В. Федінським, М.Є. Хейфецем та іншими.

Відомі праці закордонних вчених, які також зробили великий внесок у розвиток гравіметричної науки. Серед них Л. Ла-Коста, Д. Гаррисон, А. Граф, Ю. Томода, М. Гольвані та інші.

У таблиці 1 наведено основні порівняльні характеристики БЛГ на рухомій основі, з якої видно, що симетричний метод вимірювання g є більш точним (похибка вимірювань 10 мкГл), ніж несиметричний (похибка вимірювань 30 мкГл).

У таблиці 2 наведено основні порівняльні характеристики БЛГ на рухомій основі, з якої видно, що симетричний метод вимірювання g є більш точним (похибка вимірювань 10 мкГл), ніж несиметричний (похибка вимірювань 15 мкГл).

Таблиця 2

Основні порівняльні характеристики БЛГ на рухомій основі

Метод вимірювання g	Фірма виробник	Апаратура та методи зниження впливу вібрацій	Похибка мір довжини δ_L і часу δ_T , степінь вакууму P , мм. рт. ст.	Похибка вимірювання g	
				Інстру-ментальна	По внутрішній збіжності
Симетричний	Інститут метрології ім. Г. Колонетті Турин. Італія (встановлення та демонтаж 1 день)	20-секундний сейсмограф. П'єзоелектричні активні компенсатори	$\delta_L = 5 \cdot 10^{-9}$ $\delta_T = 1 \cdot 10^{-10}$ $P > 1 \cdot 10^{-6}$	10 мкГл	20 мкГл (по 100 кидкам)
	Інститут географічної зйомки, Токіо, Японія	Пружний підвіс нерухомого відбивача. П'єзодатчики-компенсатори	$\delta_L = 1 \cdot 10^{-9}$ $\delta_T = 1 \cdot 10^{-10}$ $P < 4 \cdot 10^{-6}$	10 мкГл	10 мкГл (по 100 кидкам)
Несиметричний	ІА і ЕСО АН СНД, Новосибірськ, Москва (вимірювання на пункті 3-5 днів)	20-секундний сейсмограф	$\delta_L = 1 \cdot 10^{-9}$ $\delta_T = 1 \cdot 10^{-10}$ $P < 4 \cdot 10^{-6}$	15 мкГл	20 мкГл (по 100 кидкам)
	Геодезична лабораторія ВПС, Бедфорд Массачусетс США (час розгортання менше доби)	Відсутні	$\delta_L = 1 \cdot 10^{-8}$ $\delta_T = 1 \cdot 10^{-10}$ $P < 1 \cdot 10^{-7}$	15 мкГл	20 мкГл (по 150 кидкам) 10 мкГл (на пункті за добу)
	Об'єднаний інститут експериментальної астрофізики, Боулдер, Колорадо США (час розгортання 2 години)	Активний вібростійкий 60-секундний підвіс	$\delta_L = 1 \cdot 10^{-9}$ $\delta_T = 5 \cdot 10^{-11}$ $P = 1 \cdot 10^{-5}$	14 мкГл	20 мкГл (по 10 кидкам)

Висновки

1. Розглянуто історичні етапи розвитку балістичної гравіметрії. Встановлено, що найбільш досконалими є балістичні лазерні гравіметри. Тому у наступному доцільно досліджувати саме балістичний лазерний гравіметр,

2. Проаналізовано принцип дії сучасного БЛГ,

3. Наведено основні характеристики сучасних балістичних лазерних гравіметрів на рухомій та нерухомій основі.

Показано, що для БЛГ на рухомій і на нерухомій основі симетричний метод є більш точним, ніж несиметричний метод. Тому у наступному доцільно досліджувати БЛГ з симетричним методом вимірювань g .

Список літературних джерел

1. Безвесільна О.М. Вимірювання прискорень. К.: Либідь, 2002, - 350с.