

# Балістичний гравіметр Полтавської гравіметричної обсерваторії: історія створення і модернізація

*О.І. Халявін, Л.Я. Халявіна, 2026*

Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики  
ім. С.І. Субботіна НАН України, Полтава, Україна  
Надійшла 31 березня 2026 р.

Створення балістичного гравіметра було розпочато в Полтавській гравіметричній обсерваторії в 1968 р. Після випробовування першого зразка в 1972-му р. прилад вдосконалили. Робота виконувалась провідним інженером Б.І. Бродським. Значний вклад у реалізацію проєкту вніс механік високої кваліфікації В.О. Овчинніков. До 2000 р. було створено діючий прототип БГ-2, оснащений розвинутою на той час системою реєстрації та обробки вимірів. З 2003 р. регулярно виконувалися вимірювання прискорення сили тяжіння  $g$ , точність яких поступалася точності діючих серійних приладів, що зумовило продовження робіт з удосконалення ключових блоків БГ-2. Незважаючи на обмежену точність результатів, аналіз 7-річного ряду  $g$  показав наявність припливних хвиль, зокрема півдобової місячної хвилі  $M_2$ , що свідчить про доцільність застосування балістичного гравіметра для моніторингу сили тяжіння.

З 2024 р. відновлено функціонування БГ-2. Механічні та оптичні блоки установки залишилися без змін. Модернізовано модуль системи управління, реєстрації і обробки вимірювань. Модуль створено на основі програмованого мікроконтролера STM32F407VGT6 (SYSCLC=168 МГц) у складі плати STM32F4-DISCOVERY, а також термічностабілізованого кварцового генератора OSC5A2B02 10 МГц для тактування мікроконтролера. Забезпечено технічний контроль інтервалів опитування його внутрішнього таймера. Створено програмне забезпечення для обробки вимірів та аналізу отриманих результатів. Пробні вимірювання підтвердили працездатність модуля.

**Ключові слова:** балістичний гравіметр, прискорення сили тяжіння, автоматизація вимірювань, мікроконтролер, історія створення, модернізація, пробні вимірювання.

**Вступ.** Прискорення сили тяжіння  $g$  є фундаментальним геодинамічним параметром, розподіл якого по земній поверхні та його зміни з часом визначають просторово-часову структуру гравітаційного поля та відображають перебіг геодинамічних процесів глобального, регіонального та локального масштабів. Історія гравіметрії нараховує понад три століття, а гравіметричні дані застосовуються для вирішення широкого кола завдань практичного та наукового характеру [Torge, 1989]. Гравіметричні

вимірювання на території України розпочалися в 1926 р. після заснування Полтавської гравіметричної обсерваторії (ПГО) академіком О.Я. Орловим. Гравіметрія в ПГО була основою вирішення як прикладних (гравіметрична зйомка з метою розвідки корисних копалин), так і фундаментальних наукових задач (визначення механічних властивостей земної кори та внутрішньої будови Землі) [Дычко и др., 1980]. Завдяки комплексним вимірюванням і сумісному вивченню гравіметричної,

Citation: Khalyavin O.I., & Khalyavina L.Ya. (2026). Ballistic gravimeter of the Poltava Gravimetric Observatory: history of creation and modernization. *Geofizychnyi Zhurnal*, 48(3), 89–102. <https://doi.org/10.24028/gj.v48i3.356209>.

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2026. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

астрометричної та геофізичної інформації, в 50—60 рр. ХХ ст. ПГО стала провідним центром вивчення Землі не тільки в Радянському Союзі, а й у світі. Цьому сприяло оснащення обсерваторії технологічно новітніми вимірювальними приладами. Тому, коли розпочались роботи зі створення балістичних гравіметрів, що ґрунтуються на принципах вимірів вільного падіння тіла, в Полтаві також приступили до вирішення цього завдання. Історія створення балістичного гравіметра ПГО (дещо драматична за тривалістю реалізації) та його робочі характеристики розглянуті нижче.

Детальний огляд зразків балістичних гравіметрів, напрямів їх розвитку та удосконалень функціональних модулів вимірювальних систем можна знайти в монографіях [Двуліт, 1998; Torge, 1989; Безвесільна та ін., 2014].

На рубежі ХХІ ст. стався технологічний ривок в області електроніки та комп'ютерної техніки, що дало можливість суттєво покращити точність гравіметричних вимірювань [Безвесільна та ін., 2014]. Еталоном сучасних гравіметричних приладів для наземних визначень абсолютних значень  $g$  стали серійні балістичні гравіметри FG5 і A10 виробництва фірми Micro-g LaCoste (США) [Serna et al., 2012; Micro-g LaCoste, 2012]. Застосування цих гравіметрів є основою вимірів сили тяжіння на опорних пунктах при створенні сучасних високоточних гравіметричних мереж як регіональних, так і національних [Timmen et al., 2008; Olszak et al., 2024]. Такі мережі особливо важливі для відстеження геофізичних і геодинамічних процесів.

Останні три десятиліття відмічені нарощуванням активності геодинамічних процесів у всіх оболонках Землі, які супроводжуються змінами клімату та зростанням катастрофічних явищ і впливають на життєдіяльність багатьох держав світу [Khalilov, 2010]. Навіть у такому сейсмічно спокійному регіоні, як Донецько-Дніпровська западина, відзначається активізація магматичних процесів [Гордиенко и др., 2020]. Також почастишали землетруси, магнітуди яких становлять  $M=2,2\div 4,8$  [Шля-

ховий та ін., 2025]. Тому стає актуальним моніторинг геодинамічної обстановки у цьому регіоні.

У ПГО накопичені багаторічні ряди астрономічних, геодезичних і геофізичних спостережень, продовжується проведення деяких вимірів за допомогою інструментів, що почали діяти ще в другій половині ХХ ст. Так, до 2021 р. виконувались астрооптичні спостереження на призмовій астролябії для відстеження напрямку сили тяжіння. У 2001 р. почала функціонувати GPS-станція, яка з 2008 р. стала опорним пунктом європейської (EPN) і світової (IGS) мереж глобальних навігаційних супутникових систем.

Колокація різних засобів вимірювань розширює можливості інтерпретації процесів, що відображаються у змінах геодинамічних параметрів, отриманих за допомогою відповідних інструментів. Приклади сумісних астрометричних і гравіметричних спостережень для відстеження локального гравіметричного поля наведено в публікаціях [Ron et al., 2009; Tyshchuk, Pavlyk, 2010; Yang et al., 2013]. Сумісний аналіз геодинамічних параметрів, отриманих із астрономічних і GPS-спостережень, дає підставу для підтвердження гіпотези про нарощування підземної маси в окремій ділянці Полтавського рифтогенного вузла [Халявіна, 2025].

Тому функціонування балістичного гравіметра мало б стати додатковим джерелом інформації про зміни гравітаційного поля в околі Полтави. Також ми вважаємо за необхідне розповісти про досягнення наших колег, які створили цей прилад, але через об'єктивні причини та вимогливість до результатів своєї роботи вчасно їх не оприлюднили.

**Історія створення балістичного гравіметра в ПГО.** У ПГО було розроблено два типи балістичних гравіметричних установок (БГУ) БГУ-1 та БГУ-2. Робота з реалізації цих проєктів проводилася з 1968 до початку 2000-х років. Головним виконавцем на всіх етапах (проєктування, створення системи реєстрації, удосконалення всіх вузлів комплексу) був Бродський Бенці-

он Ісакович. Значний внесок у доробку та налаштування механічних та оптичних вузлів вимірювального комплексу зробив видатний механік ПГО Овчинніков Віктор Олександрович.

Вже в 1972 р. було апробовано перший екземпляр установки БГУ-1, описаний у статтях [Бродський, 1973, 1975]. Виявлені недоліки в роботі комплексу змусили продовжити роботи зі створення досконалішого зразка гравіметра (БГУ-2).

Робота зі створення БГУ-2 виконувалась упродовж двох десятиліть. Головною причиною такої тривалості була спроба застосувати перспективну конструкцію суміщеного падіння, коли тіло з призмою падає всередині камери, яка сама також падає з деяким випередженням тіла. Це б дало змогу зменшити вплив залишків повітряних молекул у корпусі гравіметра і отримати максимальну точність вимірювань. За проектом Б.І. Бродського на одному з полтавських заводів було виготовлено камеру з ліфтом. Але довести гравіметр цієї конструкції до робочого стану не вдалося. Після випробувань кількох інших варіантів пристрою від початкової ідеї довелося відмовитись і зосередитися на створенні балістичного гравіметра простішої конструкції. Слід зауважити, що метод поєданого падіння тіла і камери в абсолютних гравіметрах був реалізований в 1990-х роках у згаданих вище гравіметрах FG5 і A10 [Serna et al., 2012].

Нова конструкція БГУ-2 стала діючою завдяки майстерності механіка ПГО В.О. Овчиннікова. Паралельно з розвитком персональних комп'ютерів Б.І. Бродський розробляв і удосконалював автоматизовану систему реєстрації та обробки вимірювань. На початку 2000-х у ПГО було розпочато пробні виміри прискорення сили тяжіння за допомогою системи БГУ-2 (рис. 1).

Нижче наведено основні оптико-механічні характеристики вимірювального комплексу.

1. Вакуумна камера заввишки 1 м, усередині якої у вертикальному плечі лазерного інтерферометра відбувається вільне падіння пробного тіла.

2. Вільно падаюче тіло — трипель-призма, закріплена всередині алюмінієвого циліндра з конусом внизу, масою 1,180 кг.

3. Нижня платформа оснащена нівелірними гвинтами. На ній закріплені: газовий гелієво-неоновий лазер, дзеркала, коліматор, світлороздільна пластина, трипель-призма нижнього плеча інтерферометра, фотоприймач.

4. Ліфт, що забезпечує підйом тіла, до його фіксації електромагнітом у верхньому (початковому) положенні.

5. Пастка, що ловить падаюче тіло, в нижній частині камери.

6. Форвакуумний насос ВН-461М.

Автоматизована система реєстрації процесу падіння тіла з призмою була розроблена Б.І. Бродським на технічному рівні, що відповідав найвищим стандартам того часу.

Моменти падіння фіксувались для 15 станцій, розташованих на заданих відстанях ( $\Delta h_i$ ), які вимірювались за кількістю інтерференційних смуг.

Електронна схема складалася з мікросхем серії K155 та інших деталей, які забезпечували частоту 10—15 МГц, фотодіоду, що реєстрував інтерференційні смуги, транзисторного підсилювача струму, який поступав на лічильники K155IE9, і в моменти, що відповідали заданій кількості імпульсів підсилювача відбувалося



Рис. 1. Вимірювальний комплекс БГ-2 зразка 2000 р.  
Fig. 1. The measuring complex BG-2 in 2000.

опитування коду часу синхрометра Ч7-37. Інформація про моменти реєстрації через LPT-порт поступала в оперативний запам'ятовуючий пристрій комп'ютера.

Регулярні вимірювання прискорення сили тяжіння виконувались з 2003 по 2012 р. включно. Щотижня процес вимірювань починався з відкачування повітря з камери БГУ-2 впродовж двох годин. Після цього виконувалась багаторазова серія кидків. Відліки часу для кожного кидка записувалися в окремий файл на диск. Після закінчення вимірів за даними, що містяться у масиві файлів, проводилася обробка, результатом якої було нормальне значення прискорення сили тяжіння  $g$ .

Багаторічні виміри показали, що вдалось досягти точності визначень  $g$  (нормальної точки)  $\sigma=0,5$  мГал. Точність результатів поступалася точності діючих на той час аналогічних приладів. Тому виконавці постійно удосконалювали ключові модулі гравіметра. На основі багаторічного досвіду роботи з БГУ-2 Б.І. Бродський дійшов висновку, що найслабшим елементом вимірювального комплексу був лазер. Але замінити лазер так і не вдалося через недостатнє фінансування.

Нижче представлені результати вимірювань — ряд нормальних точок  $g$  за період 2003—2010 рр., який містить 302 значення  $g$  (рис. 2).

Поведінка згладженої кривої  $g_s$  (вікно згладжування становить 30 діб) вказує на помітну змінюваність прискорення сили тяжіння з часом. Це могло свідчити про недотримання стабільних умов вимірювань  $g$  на різних інтервалах, що цілком пояснюється експериментами з боку виконавців з налаштування системи вимірювань для покращення точності.

Незважаючи на обмежену точність результатів, аналіз ряду  $g$  показує наявність припливних хвиль, зокрема півдобової місячної хвилі  $M_2$ , що демонструє рис. 3. Наближена оцінка амплітуди хвилі  $M_2$  — 0,04 мГал.

Наведені результати вказують на можливість застосування БГУ-2 для моніторингу сили тяжіння на пункті «Полтава» при дотриманні стабільності технічних умов вимірювань. Тому було прийнято рішення про відновлення вимірювань  $g$  за допомогою БГУ-2.

**Створення сучасного модуля системи реєстрації БГУ-2.** У 2023 р. розпочато роботи з відновлення функціонування БГУ-2. Механічні та оптичні складові установки залишилися без змін. За час паузи відбувся значний прогрес в області електроніки і обчислювальної техніки. Тому насамперед було виконано модернізацію системи реєстрації процесу вимірювань БГУ-2.

При розробці системи керування та ре-

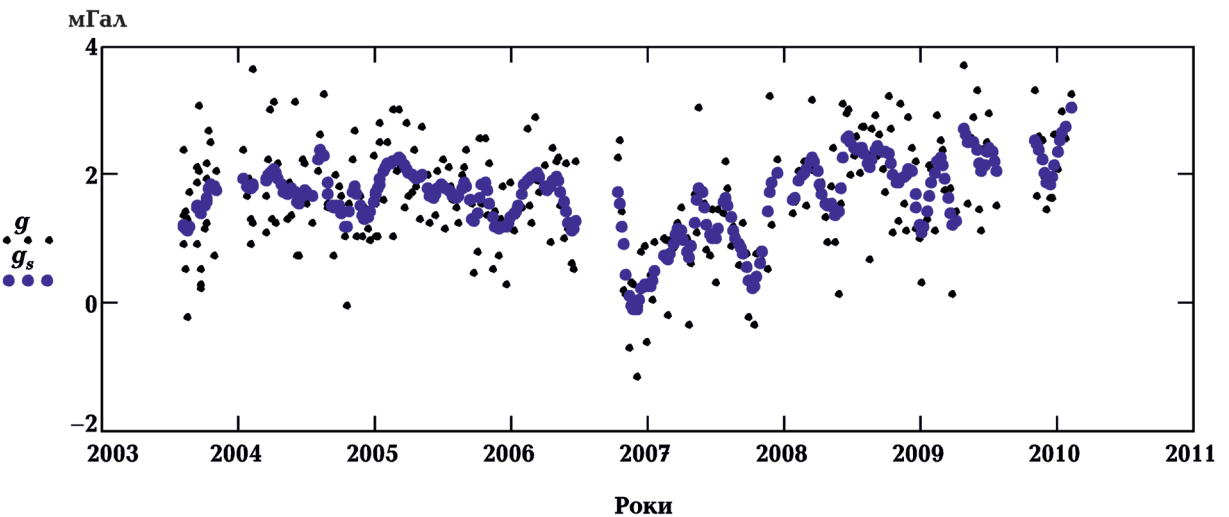


Рис. 2. Ряд нормальних значень прискорення сили тяжіння  $g$ , отриманий за допомогою БГУ-2.

Fig. 2. A series of normal values of the gravity acceleration  $g$  obtained using BG-2.

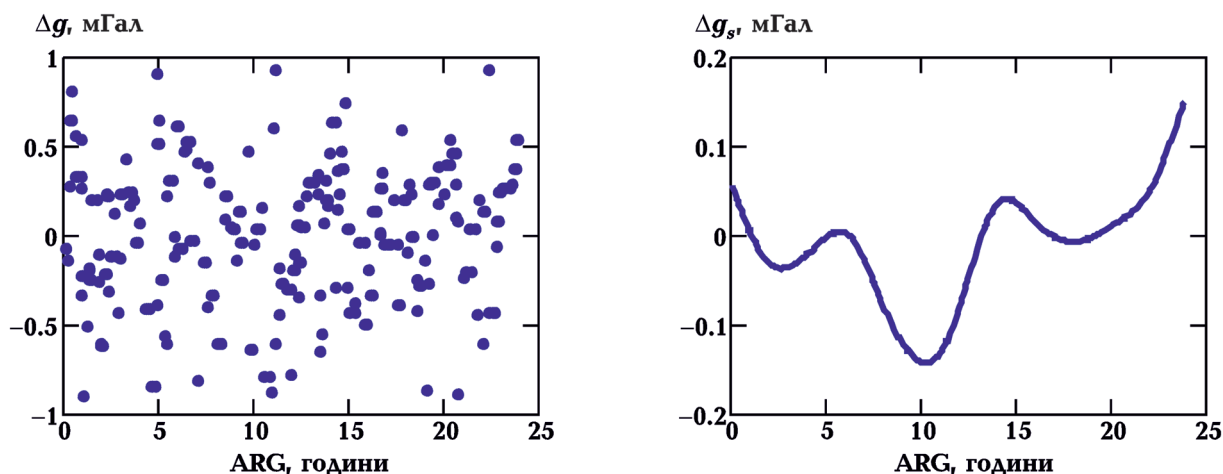


Рис. 3. Залежність значень варіацій  $g$  ( $\Delta g = g - g_s$ ) від аргументу півдобової місячної хвилі:  $ARG = 2L_M - 2\lambda$ , де  $L_M$  — середня довгота Місяця на момент спостережень,  $\lambda$  — довгота пункту спостережень.

Fig. 3. Dependence of variations of  $g$  ( $\Delta g = g - g_s$ ) on the argument of the semidiurnal lunar wave:  $ARG = 2L_M - 2\lambda$ , where  $L_M$  is the mean longitude of the Moon at the time of observations and  $\lambda$  is the longitude of the observation point.

естрації вимірів використано програмований мікроконтролер STM32F407VGT6 у складі плати STM32F4-DISCOVERY. Вона складається з двох основних частин: програматора/налагоджувача STLink і мікроконтролера STM32F407VGT6. Опис електронних компонентів міститься в документації dm00037051 (203 стор.) та Reference manual RM0090 (1315 стор.).

Мікроконтролер STM32F407VGT6 має можливості керування зовнішніми пристроями у реальному часі та продуктивність обробки сигналів, властиву сигнальним процесорам (digital signal controller, DSC).

Мікроконтролери містять інтерфейси: SPI (Serial Peripheral Interface), I2C (Inter-Integrated Circuit), I2S (Inter-Integrated Sound) для підключення різних датчиків, а також USART/UART, який використовується для обміну даними між мікроконтролером та комп'ютером.

Переваги проєкту: 1) низька вартість; 2) універсальність; 3) малогабаритність; 4) технологічність — можливість програмування внутрішніх елементів мікросхеми (тактові частоти, порти введення-виводу, USART, таймери, оперативна пам'ять), управління механізмами приладу, наявність розвинених бібліотек програмування.

Створення програми контролера проводилось у середовищах розробки IAR Embedded Workbench For ARM v8.30.1, а також STM32CubeMX. Повний функціонал графічного інтерфейсу STM32CubeMX та STM32CubeIDE — платформа розробки C/C+ та налагодження надаються абсолютно безкоштовно і постійно оновлюються.

Для програмування мікроконтролера було застосовано інтерфейс STM32CubeMX, який має засоби налаштування різних функціоналів схеми: призначення виводів контактів GPIO (рис. 4), параметрів тактування частоти мікроконтролера, таймерів, вбудованих периферійних пристроїв. У результаті налаштування генерується код CІ у середовищі STM32CubeIDE.

На рис. 5 представлено зовнішній вигляд створеного блока управління, обчислення, передачі інформації в комп'ютер.

**Алгоритм реєстрації вимірювань.** На рис. 6 наведено блок-схему функціонування оновленої системи вимірювань БГУ-2.

Цикл вимірювання починається з підйому пробного тіла до спрацьовування датчика верхнього положення та фіксації тіла електромагнітом.

Після сигналу 'скидання' призма рухається у вільному падінні, відбиваючи лазерний промінь у верхній частині інтер-

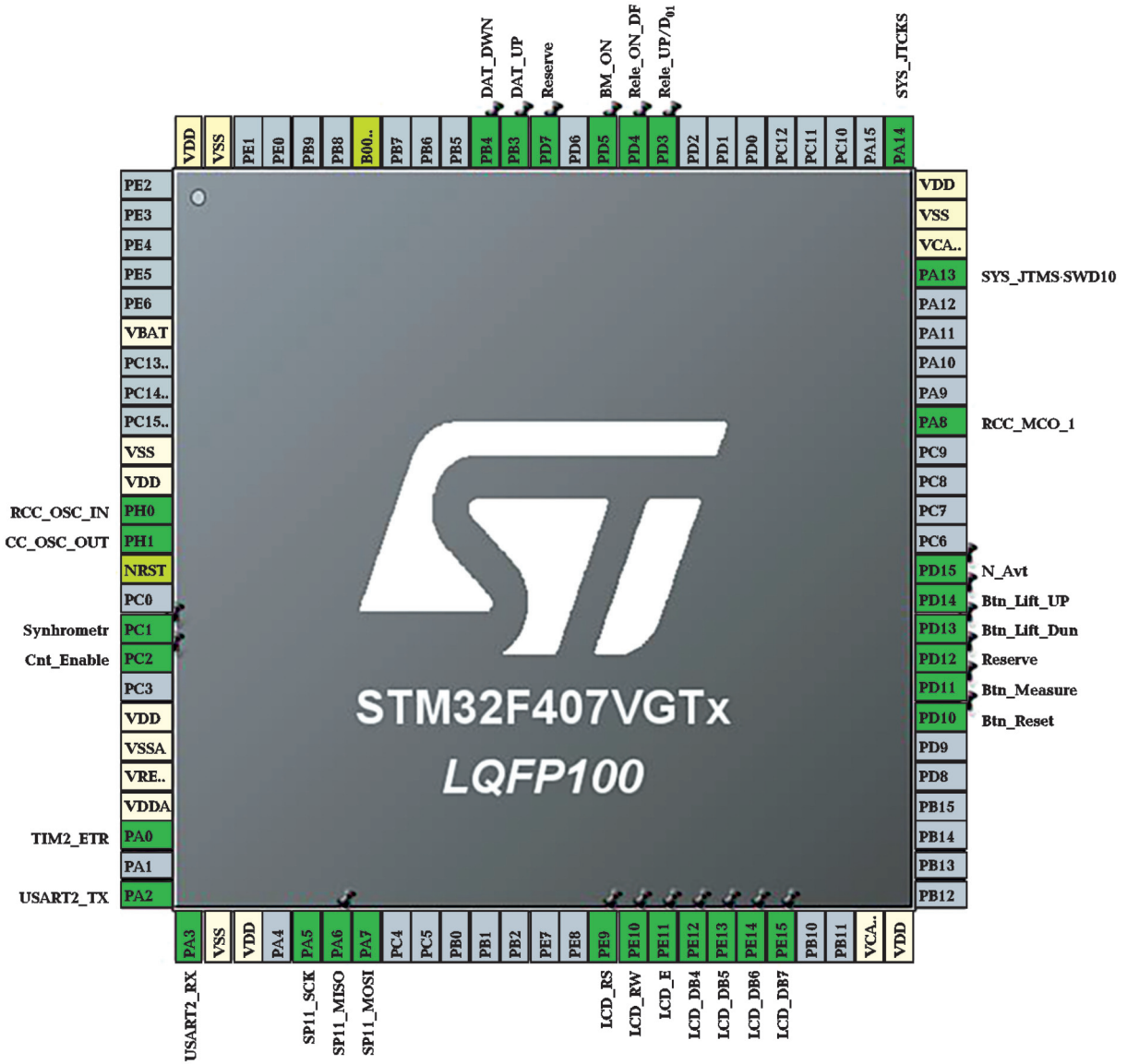


Рис. 4. Скрин екрана дисплея. Розробка модуля реєстрації БГУ-2 у середовищі графічного інтерфейсу STM32CubeMX.

Fig. 4. Screenshot of the display screen. Development of the BG-2 registration module in the STM32CubeMX graphical interface environment.

ферометра, і через світлороздільну пластину та трипель-призму нижнього плеча інтерферометра утворює інтерференційні смуги, які потрапляють на фотоприймач.

Фотоприймач, призначений для підрахунку інтерференційних смуг, складається з фотодіода, трансімпедансного підсилювача і компаратора. Після проходження тригера Шмітта сигнал поступає на вхід ETR2 32-бітного лічильника таймера TIM2. Таймер TIM2 мікроконтролера має тактову частоту 84 МГц, достатню для вимірів

кількості інтерференційних смуг на відстані падіння  $L \approx 1$  м.

Система реєструє відстані ( $L_i$ ) падаючого тіла через задані часові інтервали. Інтервал часу (за замовчуванням  $\Delta t = 1$  мс) встановлюється комп'ютером, що змінює значення регістрів таймера TIM3.

З початку падіння тіла вмикаються таймери TIM3 та TIM4 (див. рис. 6). Переривання таймера TIM3 відбувається з програмно заданим інтервалом  $\Delta t$ . При обробці переривання вміст TIM2 запам'ятовується

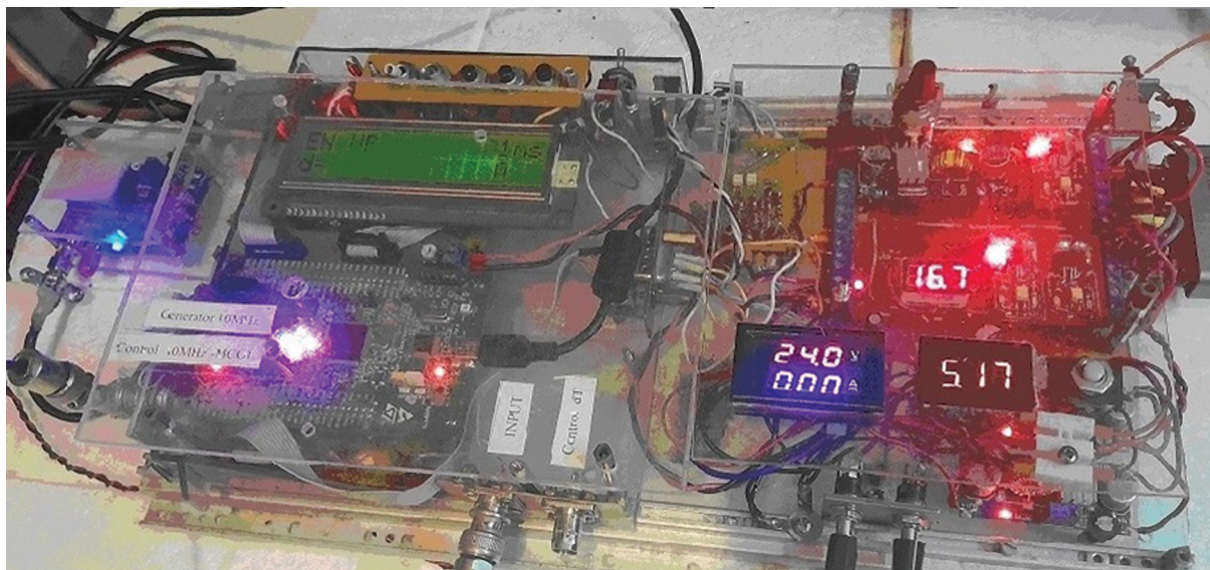


Рис. 5. Блок управління, обчислення та передачі інформації в комп'ютер.

Fig. 5. The unit for control, calculation, and information transfer to the computer.

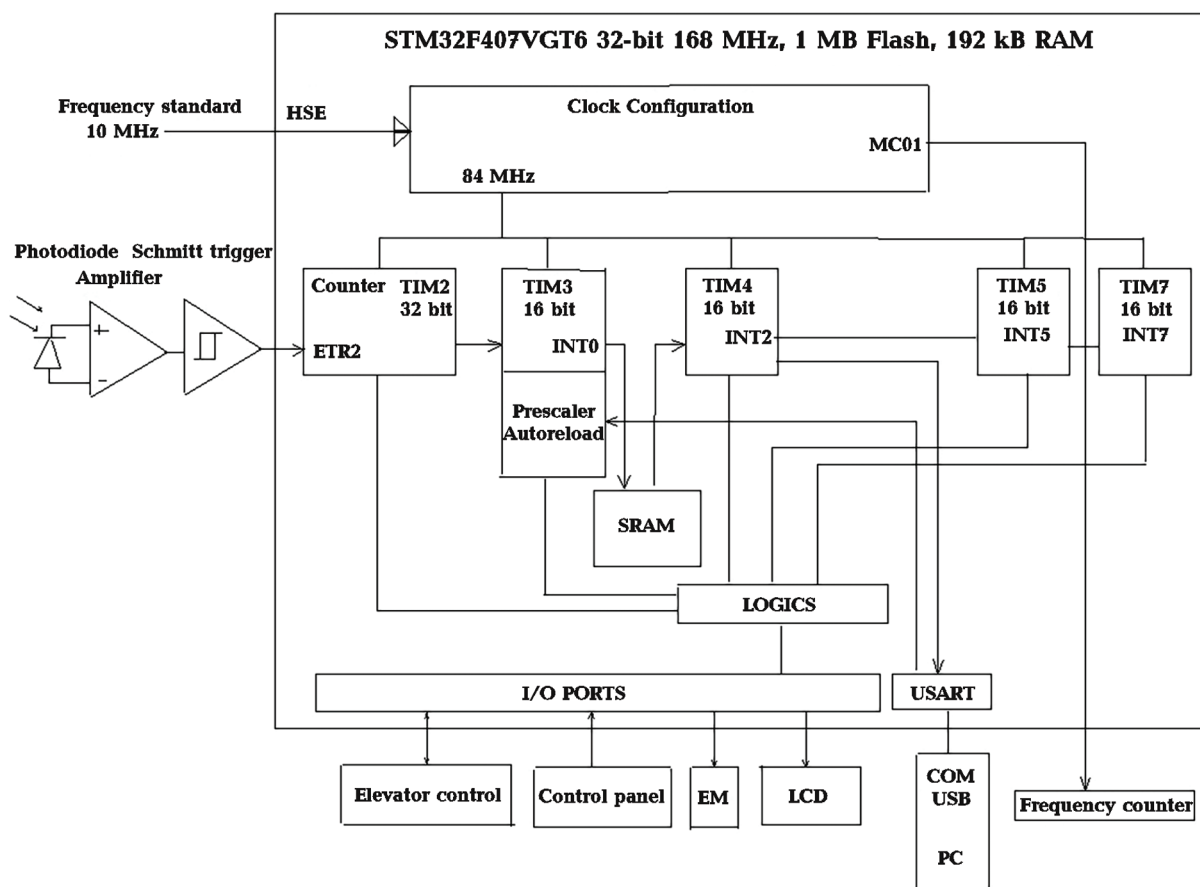


Рис. 6. Структурна схема системи вимірювань БГ-2.

Fig. 6. Structural diagram of the BG-2 measurement system.

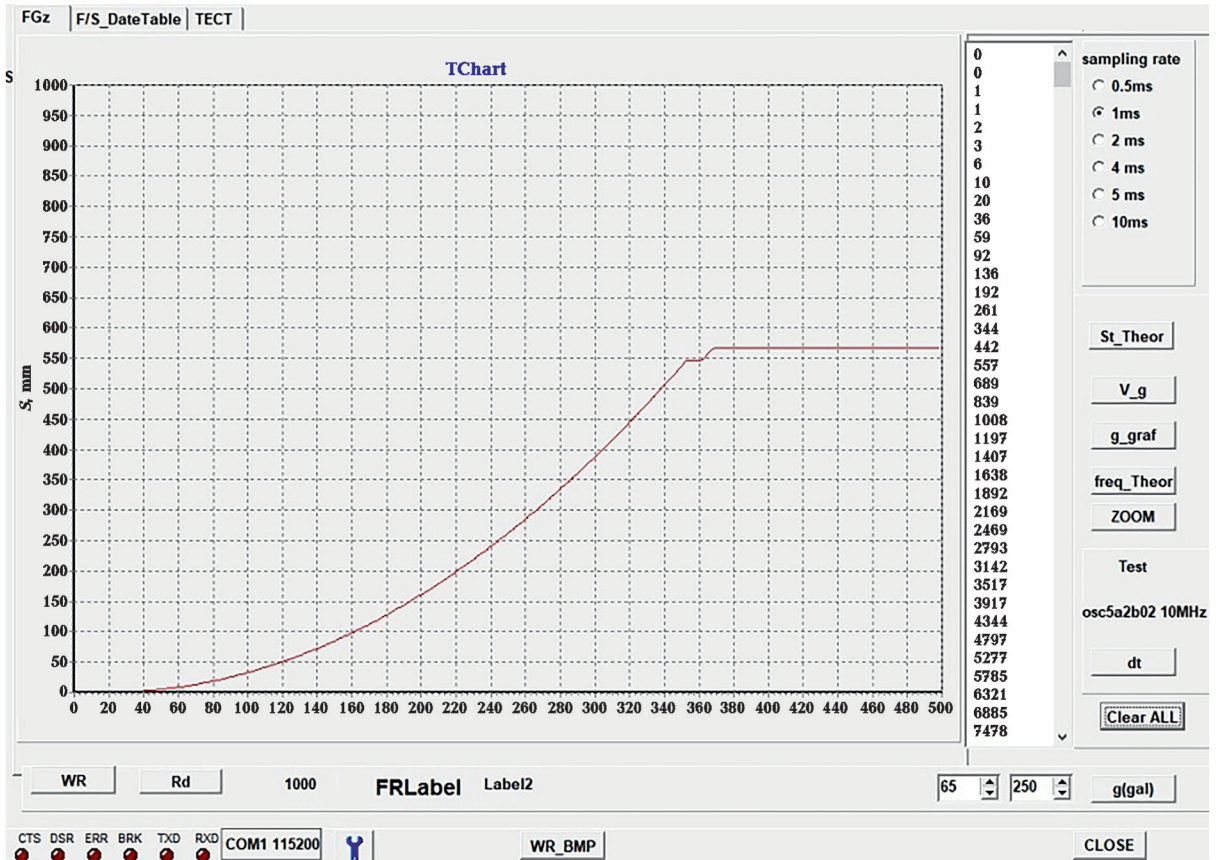


Рис. 7. Скрин екрана дисплея після кидка пробного тіла.

Fig. 7. Screenshot of the display after a test throw.

в масиві оперативного запам'ятовуючого пристрою мікроконтролера. Масив відстаней  $\{L_i\}$  визначається як

$$L_i = N_i \lambda / 2, \quad (1)$$

де  $N_i$  — кількість інтерференційних смуг в момент  $t_i$ ;  $\lambda = 633$  нм — довжина хвилі He-Ne лазера ЛГН-302.

Після падіння тіла спрацьовує таймер ТІМ4. Він передає вміст масиву оперативного запам'ятовуючого пристрою мікроконтролера через USART-порт контролера в СОМ-порт комп'ютера для подальшої обробки. Після закінчення циклу виміру програма відображає на моніторі графік залежності відстані  $L_i$  (в мм) від часу (рис. 7).

**Забезпечення точності частоти системи реєстрації мікроконтролера.** Для отримання достовірного значення  $g$  необхідно забезпечити точне значення інтервалу опи-

тування  $\Delta t$ . Моделювання для вибраного методу вимірювань показує, що похибка реального інтервалу опитування  $\delta(\Delta t) = 1$  нс призводить до похибки прискорення сили тяжіння  $\delta g \approx 2$  мГал. Випробування показали, що частотні характеристики вмонтованого на платі кварцу не відповідають вимогам точності і температурної стабільності.

Кварц на платі було відключено, мікроконтролер переведено в режим зовнішнього осцилятора BYPASS Clock Source. Через відсутність рубідієвого стандарту частоти або GPSDO-GPS-синхронізованого генератора (GPSDO GPS Disciplined Oscillator) довелося застосувати як осцилятор HSE модуль стабілізованого кварцового генератора ОСХО 10 МГц OSC5A2B02 з постійною температурою, який і визначає точність інтервалу  $\Delta t$ .

Забезпечення контролю частоти систе-

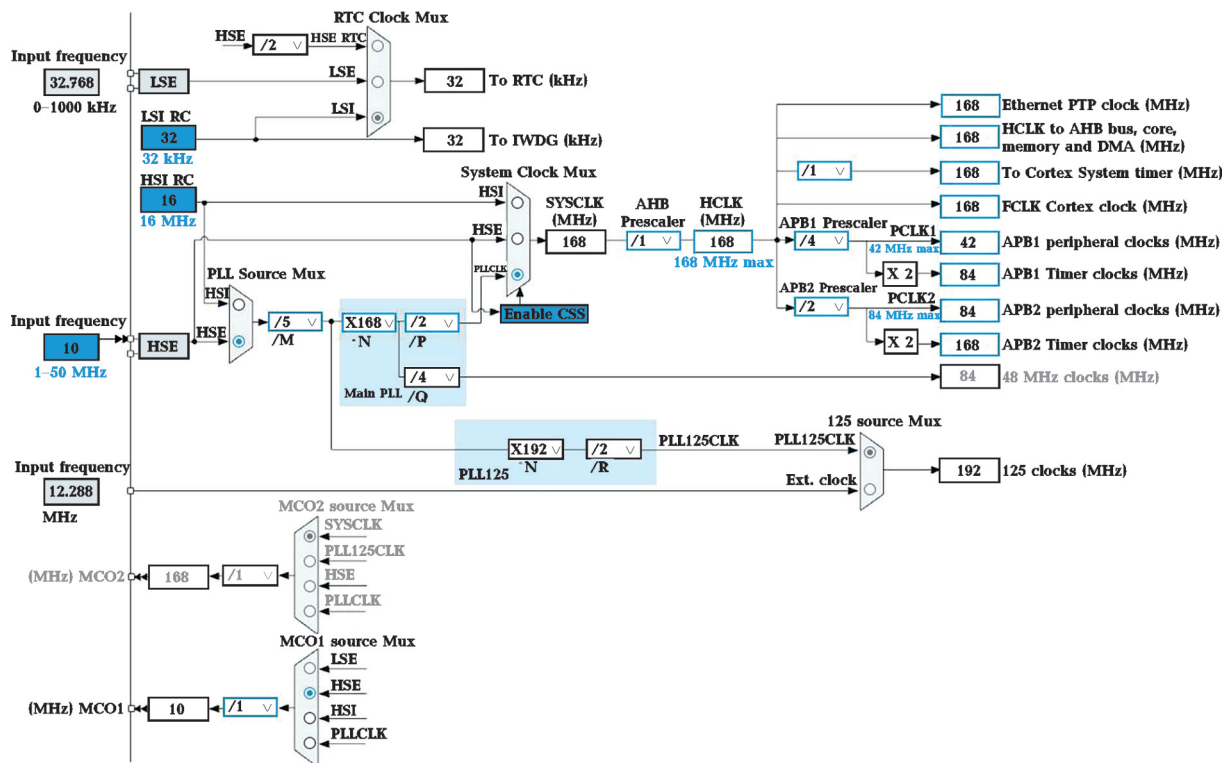


Рис. 8. Скрин екрана дисплея. Схема тактування частоти мікроконтролера.  
 Fig. 8. Display screen screenshot. Microcontroller frequency clocking scheme.

ми реєстрації здійснювалося за допомогою виходу MC01, на який надходить сигнал через програмований дільник частоти clock HSE (рис. 8).

Оскільки точність наявного частотоміру ЧЗ-54 була недостатньою для контролю частоти clock HSE (10 MHz), довелося виготовити частотомір FC (Frequency Counter) на основі мікроконтролера STM32 із застосуванням сигналу PPS GPS-модуля. ([http://roland.cordesses.free.fr/GPS\\_Si2cor.html](http://roland.cordesses.free.fr/GPS_Si2cor.html)).

**Пробні вимірювання за допомогою модернізованого модуля системи реєстрації БГУ-2.** Для перевірки працездатності модуля системи реєстрації було проведено пробні вимірювання. При розгляді результатів слід мати на увазі, що деякі блоки комплексу БГУ-2 не мали належної підготовки для точних визначень.

Для прецизійних вимірювань відстаней потрібен лазер зі стабільною довжиною хвилі. Лазер АГН-302, яким оснащено БГУ-2, відноситься до класу стабілізованих

атомарних лазерів ( $\lambda=0,6329910\pm 10^{-7}$  мкм), що містить оптико-електронну систему стабілізації частоти. У сучасних високоточних гравіметрах FG5X і А-10 також використовують газовий лазер ML-1 на гелієво-неоновій суміші з аналогічною оптико-електронною системою стабілізації частоти. Питання полягає тільки в якості конкретного лазера, що входить до складу БГУ-2. Спеціальних досліджень стабільності роботи лазера не було проведено.

Важливою частиною роботи із забезпечення вимірювань є створення вакууму в корпусі БГУ-2. У гравіметрі FG5X, який став стандартом в апаратурі вимірювання абсолютного значення сили тяжіння, рівень вакууму у вакуумній системі сягає  $10^{-4}$  Па. Для відкачки повітря з корпусу БГУ-2 було використано форвакуумний насос ВН-461М. Вимірювання рівня вакууму за допомогою термопарного манометричного перетворювача ПМТ4-М і вакуумметра термопарного ВТ-3 дало змогу

встановити, що знос насоса ВН-461М не забезпечує вакуум вище 133,3 Па.

Перші вимірювання (2024 р.) для випробування модернізованої системи реєстрації виконувалися без розрідження повітря. Отриманий результат виміру  $g$  був майже

на 1 Гал(!) нижчим, ніж еталонне значення для пункту спостережень. Наявність повітря в корпусі істотно спотворювало динаміку падіння пробного тіла: виникав ефект «поршня».

У 2025 р. після налагодження системи

**Результати вимірювань  $g$  за умови, що НСЕ — кварцовий генератор ОСХО 10 МГц OSC5A2B02 з постійною температурою**

| Дата       | Кількість кидків | Стандартне відхилення $g$ , Гал | Середнє значення $g$ , Гал | Медіана масиву значень $g$ , Гал |
|------------|------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| 01.05.2025 | 25               | 0,00274                         | 980,9741                   | 980,9744                         |
| 05.05.2025 | 50               | 0,00333                         | 980,9732                   | 980,9727                         |
| 07.05.2025 | 25               | 0,00336                         | 980,9762                   | 980,9769                         |
| 08.05.2025 | 30               | 0,00327                         | 980,9760                   | 980,9755                         |
| 12.05.2025 | 30               | 0,00205                         | 980,9729                   | 980,9728                         |
| 15.07.2025 | 30               | 0,00129                         | 980,9786                   | 980,9785                         |
| 16.07.2025 | 30               | 0,00159                         | 980,9732                   | 980,9760                         |
| 17.07.2025 | 30               | 0,00153                         | 980,9734                   | 980,9751                         |

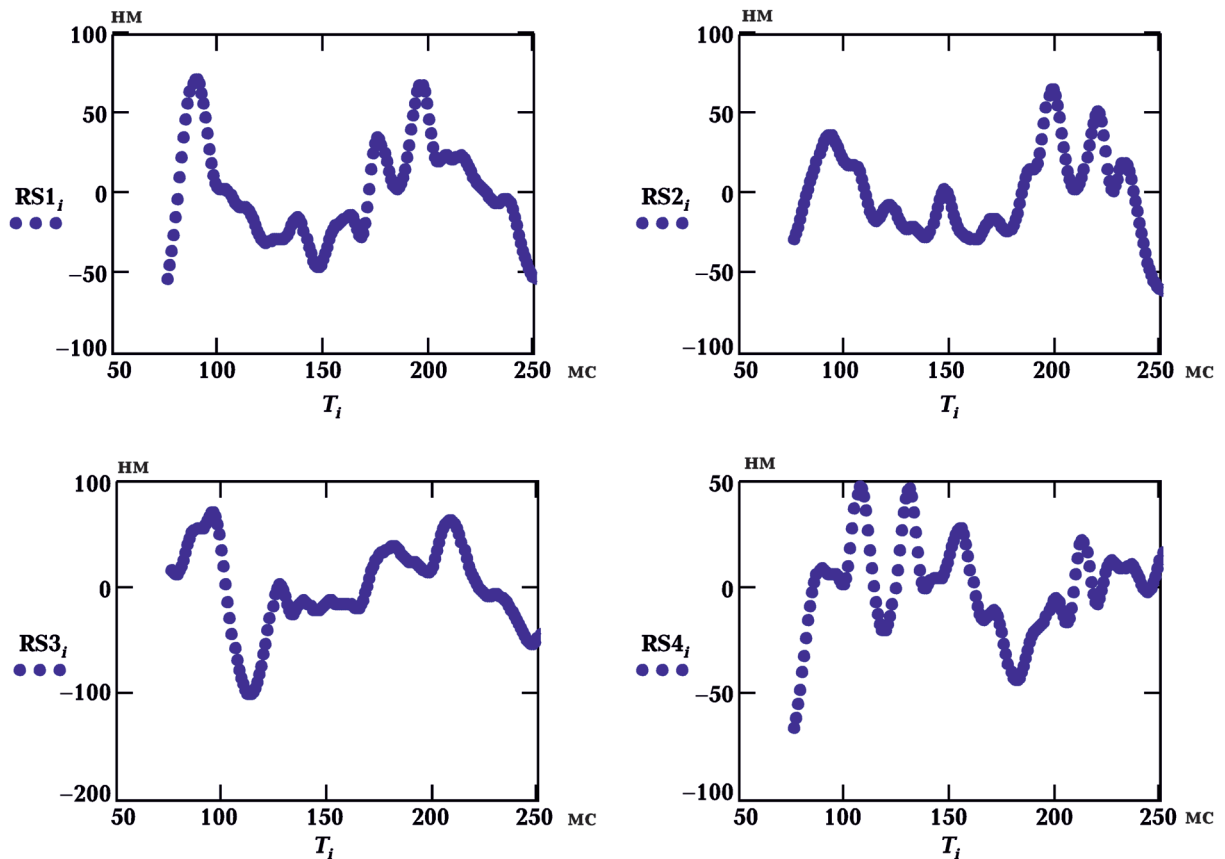


Рис. 9. Деформації реальних траєкторій падіння пробного тіла відносно модельних для кидків № 1—4 вимірювального сеансу 16.07.2025.

Fig. 9. Deformations of real trajectories of the fall of the test body relative to model ones for throws 1—4 of the measuring session on 07/16/2025.

створення вакууму було виконано близько десяти серій вимірів, кожна з яких містила 30—50 кидків. Крім забезпечення вакууму, перед кожним сеансом проводилося тестування високостабілізованого генератора НСЕ.

Обробка результатів вимірювань виконувалася на основі стандартного алгоритму. Система рівнянь за результатами одного кидка має вигляд:

$$CX = L, \quad (2)$$

де  $C = \begin{vmatrix} 1 & t & t^2/2 \end{vmatrix}$  — матриця плану;  $\{t_i = 0 + i\Delta t\}$  — масив моментів реєстрації;  $\{L_i\}$  — масив вимірних відстаней для моментів  $\{t_i\}$ , обчислених за формулою (1).

Рішення системи (2) за методом найменших квадратів дає значення невідомих:

$$X = (C^T C)^{-1} C^T L;$$

де  $X^T = |a \quad cv \quad g|$ ,  $a$  — початкова відстань;  $cv$  — коефіцієнт гальмування;  $g$  — прискорення сили тяжіння,  $T$  — операція транспонування матриці.

Розмірність матриці  $C$  обмежена діапазоном вимірів від 75-ї до 250-ї мс. Емпірично встановлено, що для вказаного часового діапазону падіння тіла відзначаються допустимі спотворення траєкторії руху.

Деформації реальної траєкторії визначаються як

$$RS = L - CX.$$

Крива  $RS$  характеризує відхилення реальної траєкторії відносно модельної, яка обчислюється на основі отриманих параметрів  $a$ ,  $cv$ ,  $g$ . Крива  $RS$  дає змогу бачити рівень спотворень траєкторії під час падіння на інтервалі  $t_i = 75 \div 250$  мс. При цьому тіло долає відстань  $\Delta L \approx 25$  см з допустимим рівнем завад.

Результати вимірювань  $g$  для декількох серій представлені в таблиці.

Параметри, що характеризують точність вимірювань  $g$ , такі: середня квадратична похибка  $g$  для одного кидка становить  $\sigma_0 = 0,5 \div 0,6$  мГал, а середня квадратич-

на похибка значення  $g$  для одного сеансу ( $\geq 30$  кидків) —  $\sigma_c = 1,2 \div 3,5$  мГал. Співвідношення між наведеними значеннями точності  $g$  для одного виміру і серії вимірів упродовж 1—2 годин ( $\sigma_c \gg \sigma_0$ ) свідчить про нестабільність умов вимірювань. Приклади систематичних деформацій траєкторій падаючої призми для декількох кидків представлені на рис. 9. Значення  $RS$  є згладженою кривою масиву  $RS$  з вікном згладжування  $w = 10$  мс, де погашено високочастотні коливання з періодами 2—5 мс.

Помітно, що деформації траєкторій для окремих кидків відрізняються, але мають спільні особливості змін із часом. Вивчення вказаних особливостей дасть змогу встановити причини завад. Але найголовнішою з них на цьому етапі налаштувань, на наш погляд, є недостатній рівень вакууму в камері гравиметра.

**Висновки.** 1. БГУ-2 можна застосувати для моніторингу локального гравітаційного поля за умови забезпечення стабільності технічних параметрів вимірювального комплексу.

2. При створенні модуля управління та реєстрації вимірювань комплексу БГУ-2 як основний елемент застосовано мікроконтролер STM32F407VGT6.

3. Для забезпечення точності інтервалу опитування як тактовий зовнішній сигнал НСЕ був використаний термостабілізований кварцовий генератор ОСХО 10 МГц OSC5A2B02.

4. Модернізована система реєстрації БГУ-2 придатна для збору та обробки вимірюваної інформації.

5. Досвід пробних вимірів показав, що однією з головних завад є недостатньо глибокий вакуум у камері БГУ-2.

6. Досягнення високоточних абсолютних значень прискорення сили тяжіння потребує технічного удосконалення системи БГУ-2: сучасного лазера, рубідієвого стандарту частоти, оновлення вакуумного обладнання для досягнення глибокого вакууму.

## Список літератури

- Безвесільна О.М., Остапчук А.А., Тимчик Г.С. *Автоматизований лазерний балістичний гравіметр*. Житомир: ЖДТУ, 2014, 176 с.
- Бродский Б.И. Баллистический гравиметр Полтавской обсерватории. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1975. Вып. 7. С. 24—26.
- Бродский Б.И. Предварительные результаты определения ускорения силы тяжести методом свободного падения тела. *Вращение и приливные деформации Земли*. 1973. Вып. 5. С. 10—11.
- Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Гордиенко Л.Я., Завгородняя О.В., Логвинов И.М., Тарасов В.Н. Зоны современной активизации территории Украины. *Геофиз. журн.* 2020. Т. 42. № 2. С. 29—52. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i2.2020.201740>.
- Двуліт П. *Гравіметрія*. Львів: ЛАГТ, 1998, 196 с.
- Дычко И.А., Булацен В.Г., Баленко В.Г. Работы А.Я. Орлова по гравиметрии и их развитие в Полтавской гравиметрической обсерватории. В сб.: *Геодинамика и астрометрия. Основания, методы, результаты*. Киев: Наук. думка, 1980, С. 52—58.
- Халявіна Л.Я. Геодинамічні дослідження в Полтавській гравіметричній обсерваторії за даними астрометричних і GPS-спостережень. *Геофиз. журн.* 2025. Т. 47. № 2. С. 339—343. <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322574>.
- Шляховий В.П., Шиян Р.В., Єльченко-Лобовська А.С., Шляховий Р.В. Сейсмічна активність Дніпровсько-Донецької западини, геодеформаційні поля та геотектоніка її сейсмогенних зон. *Геофиз. журн.* 2025. Т. 47. № 2. С. 353—358. <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322577>.
- Khalilov, E.N. (2010). Global Changes of Environment: Threatening the Progress of Civilization. *GEOCHANGE: Problems of Global Changes of the Geological Environment*, 1, 54—188. Retrieved from [https://www.academia.edu/34551385/Geochange\\_Journal\\_V1\\_2010\\_English\\_version](https://www.academia.edu/34551385/Geochange_Journal_V1_2010_English_version).
- Micro-g LaCoste. A-10 Portable Gravimeter User's Manual. (2012). Retrieved from <https://microglacoste.com/wp-content/uploads/2021/02/A-10-Manual-web.pdf>.
- Olszak, T., Rosowiecka, O., Musiatewicz, M., Targosz, P., Kulpinski, M., Krupa, P., & Stefanski, M. (2024). Modernization of the basic gravimetric control network Polish Geological Institute — implementing a modern international gravimetric system and relationship with the historical Potsdam system. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 117, 1—10. <https://doi.org/10.2478/rgg-2024-0001>.
- Ron, C., Štefka, V., & Vondrak, J. (2009). The Deflection of Local Vertical from the New CCD Zenith Tube at Ondrejov observatory. *Geophysical Research Abstracts*, 11, EGU2009-12883.
- Serna, J.M., Vaquero, P., Sainz-Maza, S., Calvo, M., Córdoba, B., López, J., López, C., & López-Fernández, J.A. (2012). *FG5 Absolute Gravimeter*. INFORME TÉCNICO IT-OAN 2012-01, 26 p. Retrieved from <https://icts-yebes.oan.es/reports/doc/IT-CDT-2012-1.pdf>.
- Timmen, L., Gitlein, O., Müller, J., Strykowski, G., & Forsberg, R. (2008). Absolute Gravimetry with the Hannover Meters JILAg-3 and FG5-220, and their Deployment in a Danish-German Cooperation. *Zeitschrift fur Geodasie, Geoinformation und Landmanagement*, 133(3), 149—163.
- Torge, W. (1989). *Gravimetry*. Published by De Gruyter, 465 p.
- Tyshchuk, M., & Pavlyk, V. (2010). Searching of plumb-line variations in the astrometric and gravimetric data of Poltava. *The 6<sup>th</sup> Orlov conference proceeding: The study of the Earth as a planet by methods of geophysics, geodesy and astronomy*, Kiev (pp. 167—170).
- Yang, Y.Z., Ping, J.S., & Li, Z.X. (2013). Plumb Line Variations (PLV) at China and Their Relation with Earthquakes and Underground Materials Changes. *Open Journal of Geology*, (3), 38—40. <https://doi.org/10.4236/ojg.2013.32B009>.

## Ballistic gravimeter of the Poltava Gravimetric Observatory: history of creation and modernization

*O.I. Khalyavin, L.Ya. Khalyavina, 2026*

Poltava Gravimetric Observatory of S. Subbotin Institute of Geophysics  
of National Academy of Sciences of Ukraine, Poltava, Ukraine

Development of the ballistic gravimeter began at the Poltava Gravimetric Observatory in 1968. After the first prototype was tested in 1972, it was updated further. Lead engineer B.I. Brodskiy supervised the work. A highly qualified mechanic, V.A. Ovchinnikov, made significant contributions to the project. By 2000, a working BG-2 prototype had been built; it was equipped with an advanced measurement recording and processing system. Since 2003, regular measurements of the gravity acceleration  $g$  had been conducted. The accuracy of these measurements was inferior to that of commercial instruments, prompting continued work on improving BG-2's key components. Despite the limited accuracy of the results, analysis of a 7-year  $g$  data series showed the presence of tidal waves, in particular the semidiurnal lunar  $M_2$  wave, demonstrating the feasibility of using the equipment for gravity monitoring.

BG-2 resumed operation in 2024. The mechanical and optical units remained unchanged. The control, recording, and measurement processing module was modernized. It is based on an STM32F407VGT6 programmable microcontroller (MCU) (SYS-CLC=168 MHz), integrated into the STM32F4-DISCOVERY board, as well an OSC5A2B02 10 MHz temperature-stabilized oscillator for MCU clocking. The MCU's internal timer polling intervals are monitored. Software for processing measurements and analyzing the obtained results was developed. Trial measurements verified the module's functionality.

**Key words:** ballistic gravimeter, gravity acceleration, automation of measurements, microcontroller, history of creation, modernization, test measurements.

### References

- Bezvesilna, O.M., Ostapchuk, A.A., & Tymchyk, G.S. (2014). *Automated laser ballistic gravimeter*. Zhytomyr: ZhDTU, 176 p. (in Ukrainian).
- Brodskiy, B.I. (1975). Ballistic Gravimeter of the Poltava Observatory. *Rotation and tidal deformations of the Earth*, (7), 24—26 (in Russian).
- Brodskiy, B.I. (1973). Preliminary Results of Determining the Acceleration of Gravity by the Free-Fall Method. *Rotation and tidal deformations of the Earth*, (5), 10—11 (in Russian).
- Gordienko, V.V., Gordienko, I.V., Gordienko, L. Ya., Zavgorodnyaya, O.V., Logvinov, I.M., & Tarasov, V.N. (2020). Zones of recent activation of Ukraine. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 42(2), 29—52. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i2.2020.201740> (in Russian).
- Dvulit, P. (1998). *Gravimetry*. Lviv: LAGT, 196 p. (in Ukrainian).
- Dychko, I.A., Bulatsen, V.G., & Balenko, V.G. (1980). The works by A.Ya. Orlov on Gravimetry and their development at the Poltava Observatory. In *Geodynamics and Astrometry. Bases. Methods. Results* (pp. 52—58). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Khalyavina, L.Ya. (2025). Geodynamic studies at the Poltava Gravimetric Observatory based on astrometric and GPS observations. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 339—343. <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322574> (in Ukrainian).

- Shliahovyi, V.P., Shyian, R.V., Yelchenko-Lobovska, A.S., & Shliahovyi, R.V. (2025) Seismic activity of the Dnieper-Donetsk Basin, geodeformation fields and geotectonics of its seismogenic zones. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 353—358. <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322577> (in Ukrainian).
- Khalilov, E.N. (2010). Global Changes of Environment: Threatening the Progress of Civilization. *GEOCHANGE: Problems of Global Changes of the Geological Environment*, 1, 54—188. Retrieved from [https://www.academia.edu/34551385/Geochange\\_Journal\\_V1\\_2010\\_English\\_version](https://www.academia.edu/34551385/Geochange_Journal_V1_2010_English_version).
- Micro-g LaCoste. A-10 Portable Gravimeter User's Manual. (2012). Retrieved from <https://microglacoste.com/wp-content/uploads/2021/02/A-10-Manual-web.pdf>.
- Olszak, T., Rosowiecka, O., Musiatewicz, M., Targosz, P., Kulpinski, M., Krupa, P., & Stefanski, M. (2024). Modernization of the basic gravimetric control network Polish Geological Institute — implementing a modern international gravimetric system and relationship with the historical Potsdam system. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 117, 1—10. <https://doi.org/10.2478/rgg-2024-0001>.
- Ron, C., Štefka, V., & Vondrak, J. (2009). The Deflection of Local Vertical from the New CCD Zenith Tube at Ondrejov observatory. *Geophysical Research Abstracts*, 11, EGU2009-12883.
- Serna, J.M., Vaquero, P., Sainz-Maza, S., Calvo, M., Córdoba, B., López, J., López, C., & López-Fernández, J.A. (2012). *FG5 Absolute Gravimeter*. INFORME TÉCNICO IT-OAN 2012-01, 26 p. Retrieved from <https://icts-yebes.oan.es/reports/doc/IT-CDT-2012-1.pdf>.
- Timmen, L., Gitlein, O., Müller, J., Strykowski, G., & Forsberg, R. (2008). Absolute Gravimetry with the Hannover Meters JILAg-3 and FG5-220, and their Deployment in a Danish-German Cooperation. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 133(3), 149—163.
- Torge, W. (1989). *Gravimetry*. Published by De Gruyter, 465 p.
- Tyshchuk, M., & Pavlyk, V. (2010). Searching of plumb-line variations in the astrometric and gravimetric data of Poltava. *The 6<sup>th</sup> Orlov conference proceeding: The study of the Earth as a planet by methods of geophysics, geodesy and astronomy*, Kiev (pp. 167—170).
- Yang, Y.Z., Ping, J.S., & Li, Z.X. (2013). Plumb Line Variations (PLV) at China and Their Relation with Earthquakes and Underground Materials Changes. *Open Journal of Geology*, (3), 38—40. <https://doi.org/10.4236/ojg.2013.32B009>.