

Навчально-науковий інститут «Інститут  
геології»

Київський національний університет імені  
Тараса Шевченка

Дмитро Безродний

# Гравіметрія

Методичні вказівки  
з лабораторного практикуму

2024

Гравіметрія. Методичні вказівки з лабораторного практикуму для студентів ННІ «Інститут геології» за спеціальністю 103 «Науки про Землю» / Упорядн.: Дмитро Безродний, 2024 - 53 с.

Рецензент: завідувач кафедри геофізики кандидат геол. н. В.І.Онищук

Рекомендовано до публікації вченою радою ННІ «Інститут геології»

протокол №      від      жовтня 2024 р.

# Зміст

Лабораторна робота №1. Вивчення будови кварцових астазованих гравіметрів.....	5
Лабораторна робота №2. Підготовка гравіметрів до польових спостережень. Частина 1 (2 год.) .....	20
Лабораторна робота №3. Підготовка гравіметрів до польових спостережень. Частина 2 (2 год.) .....	29
Лабораторна робота № 4. Обробка даних вимірювання сили тяжіння відносним гравіметром .....	35
Лабораторна робота №5. Якісна інтерпретація гравітаційних аномалій.....	38
Лабораторна робота №6. Пряма задача гравіметрії для тіл правильної геометричної форми. Кількісний аналіз гравітаційних аномалій.....	45
Лабораторна робота №7. Аналітичні методи розв'язку оберненої задачі для деяких тіл правильної геометричної форми (метод характерних точок).....	50
Список використаних джерел .....	53

## ВСТУП

У цьому виданні наводяться методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з навчального курсу «Гравіметрія»), які проводяться для студентів-геофізиків третього курсу на кафедрі геофізики Навчально-наукового інституту «Інститут геології».

Основною метою лабораторних робіт є вивчення кварцових гравіметрів: їхнє призначення та будова, регулювання приладів та методика польових вимірювань, обробка безпосередньо вимірів і зображення результатів. При обробці вимірів головне завдання полягає у досягненні у здобувачів розуміння визначень, що використовуються при обробці результатів, а саме, відносні вимірювання, зсув нуль-пункту гравіметрів, похибка вимірювань, їхнє вирівнювання, а також аномалії сили тяжіння в різних редукціях. В другій частині «Вказівок» розглядаються найпростіші задачі якісної та кількісної інтерпретації даних польових гравіметричних спостережень на реальних аномальних гравіметричних об'єктах України.

# Лабораторна робота №1. Вивчення будови кварцових астазованих гравіметрів

**Мета роботи.** Вивчити принцип роботи та будову кварцових астазованих гравіметрів.

## Теоретичні відомості

### *1. Пружні системи гравіметрів*

Сучасні кварцові гравіметри побудовані за принципом вертикального сейсмографа Голицина. Він запропонував чуттєві пружинні системи для реєстрації вертикальних змішень ґрунту при землетрусах. З можливих систем сейсмографа Голицина в гравіметрах використовуються дві (рис. 1.1, а, б). У першій із систем (рис. 1.1, а) пружина АВ спрямована до горизонтального важеля під гострим кутом. В другій системі (рис. 1,б) – нижній кінець головної пружини АВ прикріплюється до відростка ОВ на важелі.

Висока чутливість систем з рис. 1.1 пояснюється тим, що вони відносяться до класу так званих астазованих, тобто нестійких. Це означає, що системи працюють у положенні нестійкої рівноваги. В цьому випадку навіть невелика зміна сили, що прикладена до важеля, приводить до значного його переміщення, показуючи тим самим велику кутову чутливість системи.

Вперше наприкінці тридцятих і сорокових років минулого століття гравіметри цього типу були побудовані в США.

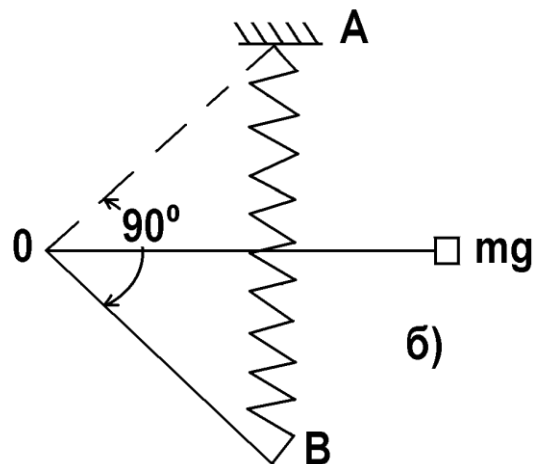
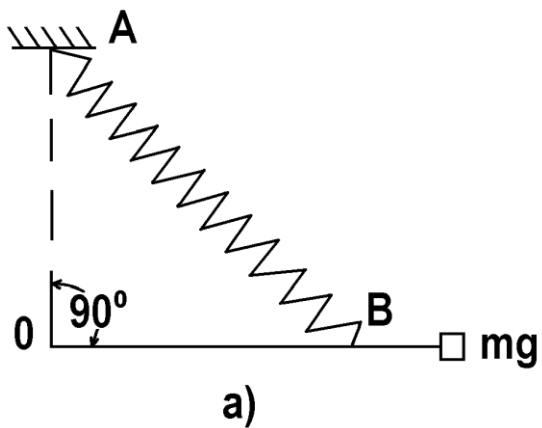


Рис. 1.1. Варіанти систем сейсмографа Голіцина [1, 3, 4]

а - пружина АВ спрямована до горизонтального важеля під гострим кутом, б - нижній кінець пружини АВ прикріплюється до відростка ОВ

## *1.1. Пружинні гравіметри*

Гравіметри даного типу побудовані за принципом пружинних терезів. Їхнім основним елементом є кварцова пружина, пружний момент якої врівноважує момент сили тяжіння. За розрахунками відомого конструктора гравіметрів А.Графа [1, 2, 4] відомо, що якщо потрібно вимірити прискорення сили тяжіння  $g$  з точністю до 0,01 мГал, то пружні властивості пружини повинні бути сталими в часі з точністю до  $10^{-8}$  своєї величини. Якщо допустити зсув нуля-пункту гравіметра 0,1 мГал/год, то й у цьому випадку сталість жорсткості пружини повинна зберігатися з точністю  $10^{-7}$  за проміжок часу в одну годину [1, 2, 4]. Дотримання настільки високих вимог до пружин даного типу гравіметрів досягається за рахунок використання спеціально оброблених кварцових пружин.

Вони мають наступні переваги:

- у кварцу невеликий пружний наслідок. Це явище, коли деформація продовжується протягом більш тривалого проміжку часу, ніж час прикладання або зняття навантаження.;
- кварц технологічний і можливе виготовлення системи без спеціальних місць кріплення нитей і пружин шляхом потовщення їхніх кінців. Система гравіметра разом з рамою -це єдина суцільна споруда. Термічні і механічні напруги в такий спосіб зводяться до мінімуму;
- кварц має невелику питому вагу і тому прискорення, що зазнаються чутливою системою при транспортуванні, стають менш помітними. Це дозволяє обходитися без фіксації маси та пружини при транспортуванні гравіметрів. Невелика маса системи гравіметра сприяє швидкому сприйняттю нею навколишньої температури, а тертя об повітря приводить до швидкого згасання її коливань. Власне система гравіметра знаходиться в герметично закритому корпусі, так що тиск у посудині коливається в межах 1 – 8 мм рт. ст. Але середовище навіть з таким низьким тиском достатньо для демпфування системи;
- у кварцу незначний коефіцієнт температурного розширення. Тому при зміні температури не з'являються скільки-небудь значні напруги, зв'язані зі зміною довжини або об'єму кварцових деталей.

Кварцові системи також мають недоліки та деякі труднощі при їхньому виготовленні:

- у кварцу мала границя текучості, а внаслідок перегрівання він змінює свою структуру й у ньому відбувається перекристалізація;

- кварц крихкий, тому система гравіметра не аретується. Вона легко руйнується при недбалому поводженні. Це вимагає дбайливого ставлення при транспортуванні і роботі з ними;

- кварцові пружини і нитки мають досить великий термоеластичний коефіцієнт, так що змінюється їхня жорсткість при зміні температури. У кварцу додатний термоеластичний коефіцієнт, тобто з підвищенням температури жорсткість кварцових пружин зростає. Зміна температури на 1°C приводить до деформації головної пружини, що відповідає зміні сили тяжіння на 110 мГал. Відповідно зміна температури системи навіть на 0,01°C призводить до помилки у вимірі сили тяжіння до 1,1 мГал. Крім того, термоеластичний коефіцієнт зі зміною температури змінюється нелінійно. Тому вплив температури повинен бути ослаблений, щоб помилка не перевищувала декількох сотих мГал. Для цього в конструкції системи використовуються компенсатори, а також інші захисні пристосування;

- з плином часу важіль пружної системи гравіметра змінює своє положення. Це явище зв'язане зі зміною в часі пружних властивостей – повзучістю пружин гравіметра і призводить до істотного зсуву нуля-пункту. Тому що повзучість це процес безупинної пластичної деформації під дією постійного навантаження, то в кварцових гравіметрів зсув нуля-пункту відбувається в одну сторону (індекс системи зміщується у бік збільшення сили тяжіння). Чутливість системи постійно послабляється. Тому кварцові гравіметри через кілька років експлуатації вимагають заводського переюстирування системи;

- кварц діелектрик і при русі системи в повітрі на ній з'являються електростатичні заряди. Наявність зарядів на системі приводить до плавної зміни відліків і до «залипання» чутливого елемента. Для зняття зарядів у деяких типах гравіметрів використовують іонізування середовища, у якій знаходиться система, за допомогою ізотопу  $^{239}\text{Pu}$ .

## **1.2. Будова системи гравіметрів**

### **1.2.1. Гравіметр ГНУ-КС**

На рис. 1.2 показана пружна система гравіметра ГНУ-КС (гравіметр наземний вузькодіапазонний, клас С) [1, 3]. Гравіметр цього типу побудований на принципі вертикального сейсмографа Голицина.

На рис. 1.2.: 1 – важіль системи, а до його відростка 2 прикріплений нижній кінець головної пружини 3. Верхній її кінець нерухомо прикріплений до основного каркаса системи 4. Головна пружина має від'ємну початкову довжину порядку декількох міліметрів. При виготовленні системи верхній кінець пружини переміщується так, щоб забезпечити необхідну чутливість астазованої системи. Чутливість систем із пружинами нульової і від'ємної початкової довжини може регулюватися в широких межах. Ця властивість використовується у всіх кварцових гравіметрах. Важіль утримується в рівновазі пружною силою головної пружини 3, діапазонної пружини 5 та вимірювальної пружини 9 і силою закручування ниток підвісу 6 важеля 1.

Рух важелю обмежений декількома десятими міліметра. До важелю, що представляє кварцовий стержень, прикріплене платинове циліндричне навісок 7, що служить для збільшення моменту мас, а також для зменшення дії електричних зарядів і прилипання маятника до обмежувачів 24. За допомогою пружини 5 змінюється діапазон виміру. Верхній кінець її прикріплений до діапазонного механізму корпусу 8, а нижній до спеціального відростка важеля. Жорсткість діапазонної пружини в 100-200 разів менше жорсткості головної пружини.

У системах оберտального типу мірою сили тяжіння є кут відхилення важелю від горизонту. Але в гравіметрах цей кут прямо не вимірюється, а використовується компенсаційний (нульовий) спосіб. У цьому способі виміряється сила, що приводить важіль системи в горизонтальне положення. Компенсація зміни сили тяжіння проводиться за допомогою компенсаційної (вимірювальної) пружини 9. Верхній кінець її прикріплений до рухливого штока вимірювального пристрою приладу 10. Нижній її кінець прикріплений до відростка на рамці 11, що обертається на нитках 12. До рамки прикріплені нитки 6 підвісу важелю 1. Фіксується нульове положення важелю за допомогою оптичної системи, що складається з освітлювача 13, відбиваючого дзеркала 14 і призми 15, а також мікроскопа 16. На окулярній шкалі мікроскопа 25 розглядається тінь індексу 17 з інтерференційною смугою посередині.

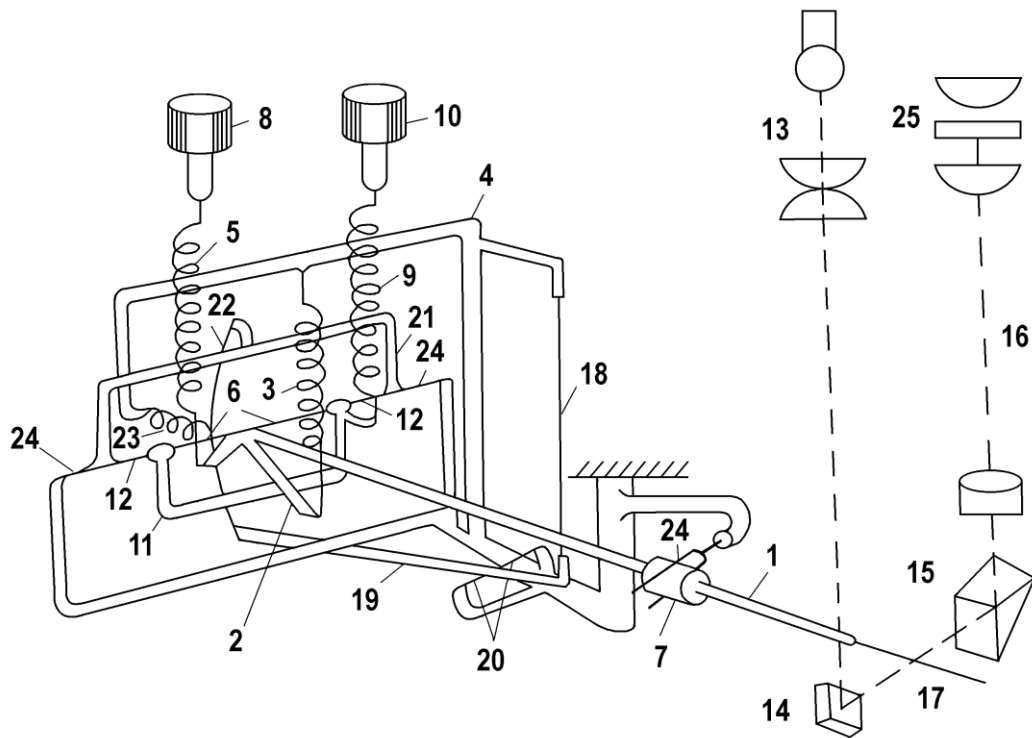


Рис. 1.2. Будава кварцовога гравіметра ГНУ-КС [1, 3]

Дія чуттєвого елемента системи полягає в наступному. При зміні сили тяжіння (наприклад, при збільшенні) важіль системи відхиляється вниз від початкового положення рівноваги до того часу, поки сили, викликані деформацією головної 3 і діапазонної 5 пружин і ниток підвісу важелю 6, не зрівноважать зміну сили тяжіння. Головна пружина 3 з'єднана з відростком важелю таким чином, що при збільшенні сили тяжіння плече пружної сили зменшується, а при зменшенні сили тяжіння - зростає. Тому виникає додатковий приріст пружного моменту, що збігається за знаком зі зміною сили тяжіння. У зв'язку з цим невеликі зміни сили тяжіння викликають великі деформації головної пружини і, таким чином, великі кути повороту важелю.

Такі пружинні терези називаються пружно-астазованими. Для даного гравіметра кутова чутливість складає 50 - 100" дуги на 1 мГал.

Під час виміру важіль приводиться в горизонтальне положення шляхом компенсації зміни сили тяжіння закручуванням ниток підвісу 6 важелю. Нитка закручується поворотом рамки 11 шляхом зміни розтягування вимірювальної пружини 9 за допомогою мікрометричного пристрою 10 та виводиться в нульове положення. Це фіксується за допомогою, описаної вище оптичної системи. В остаточному підсумку голівка мікрометричного гвинта обертається доти, поки світла смужка в центрі індексу не збіжиться з центральним штрихом окулярної шкали. Висока чутливість системи дозволяє фіксувати нульове положення просто за допомогою мікроскопа наочно.

У розглянутого вузькодіапазонного гравіметра можлива компенсація вимірювальним пристроєм приросту сили тяжіння величиною до 100 мГал. У кварцових пружин досить великий термоеластичний коефіцієнт. Тому необхідний надійний захист системи від температурних впливів. Це досягається, насамперед, за допомогою температурного компенсатора. До нього відносяться металева нитка 18, важіль температурного компенсатора 19 (його вісь обертання 20), рамка компенсатора 21 і прогнута нитка 22, що з'єднує важіль компенсатора з рамкою. Важіль компенсатора 19 знаходиться увесь час під дією закручених ниток підвісу. Прогин нитки 22 регулюється при виготовленні системи пружиною 23.

Дія компенсатора полягає в наступному. Нехай, наприклад, температура зростає. У кварцу додатний термоеластичний коефіцієнт. Тому зі збільшенням температури жорсткість головної пружини зростає, і

важіль системи 1 трохи піднімається. Але з підвищенням температури подовжується металева нить 18, правий кінець важелю температурного компенсатора 19 (рис. 1.2) переміститься вниз, лівий кінець нагору, прогнута нитка 22 послабиться і рамка компенсатора 21 через нитки підвісу 24 опустить важіль. При виготовленні приладу зрівнюються ці дві дії, що себе взаємно компенсують. Тут враховується наступна обставина. Жорсткість головної пружини при зміні температури змінюється нелінійно і, таким чином, нелінійно зміниться положення важелю. У той же час подовження металевої нитки лінійне і ця лінійність в остаточному підсумку передається рамці температурного компенсатора. У гравіметрі ГНУ-КС кварцова нитка 22 переходу від важелю 19 компенсатора до рамки 21 прогнута для того, щоб перетворити лінійне переміщення важелю 19 компенсатора в нелінійне обертання рамки 21, щоб компенсувати нелінійне переміщення важеля системи зі зміною температури. Температурний компенсатор ефективний, якщо всі деталі системи мають однакову температуру. Тому система гравіметра ретельно теплоізолювана, його варто оберегати від прямих сонячних променів і взагалі від різкого підвищення температури.

### **1.2.2. Гравіметр ГНУ-КВ (гравіметр класу В)**

Це також кварцовий астазований вузькодіапазонний гравіметр більш вищого класу точності, заснований на принципі вертикального сейсмографа Голіцина. Його система показана на рис. 1.3. Тут 1 – важіль системи, до відростка 2 якого прикріплений нижній кінець головної пружини 3. Верхній кінець її на відміну від гравіметра ГНУ-КС укріплюється не до корпусу приладу, а до другого важеля температурного компенсатора 20. Важіль має складну форму і складається з осьового стержня, до якого прикріплений горизонтальний стержень 1 із платиновим важелем 6. 3 важелем зв'язаний уже згадуваний нижній відросток 2, а також задній відросток 8 і вертикальний Г-подібний відросток 13. Важіль 1 утримується в рівновазі пружною силою головної пружини 3, діапазонної 4 і силою закручування нитей підвісу 5 важеля. Діапазонна пружина 4 прикріплена нижнім кінцем до заднього відростка 8, а верхнім – до діапазонного пристрою 7. На одній осі з важелем знаходиться вимірювальна рамка 10. Її осями обертання служать горизонтальні нитки 11, прикріплені до основного каркаса 12 кварцової

системи. До відростка рамки 10 прикріплена вимірювальна (компенсаційна) пружина 14, верхній кінець якої зв'язаний з вимірювальним мікрометричним пристроєм 15.

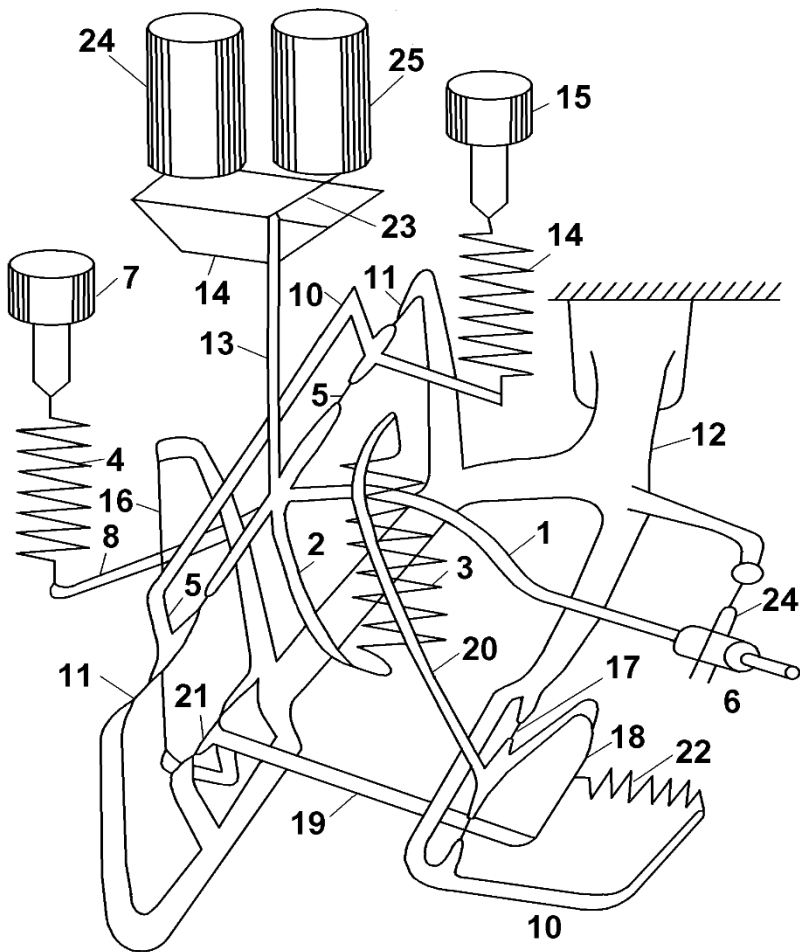


Рис. 1.3. Будова кварцового гравіметра ГНУ-КВ [1, 3]

Температурний компенсатор гравіметра ГНУ-КВ досить складний і складається з першого 19 і другого 20 важелів. Перший важіль 19 температурного компенсатора обертається на нитках 21. До одного його кінця приварена металева нитка 16, а другий кінець нитки закріплений на основному каркасі 12 кварцової системи. Другий важіль температурного компенсатора 20 обертається на нитках 17 підвісу. Один кінець його, як уже відзначалося, прикріплений до верхнього кінця головної пружини 3, а другий – ниткою 18 з'єднаний з важелем 19 температурного компенсатора. Вигнута нитка 18 відтягується пружиною 22. Основний каркас 12 кварцової системи прикріплений до металевої підстави корпусу гравіметра.

Система гравіметра ГНУ-КВ також відноситься до астазованих і має високу механічну чутливість до зміни сили тяжіння. При збільшенні сили тяжіння важіль відхиляється вниз, і головна пружина 3 розтягується. При цьому зменшується плече дії пружини і пружний компенсуючий момент зростає повільно. Тому при зміні моменту сили тяжіння необхідний більший кут повороту важеля, щоб компенсувати його моментом головної пружини. При зменшенні сили тяжіння важіль відхиляється вгору, плече головної пружини збільшується і гравіметр одержує додаткове зміщення на більший кут повороту. Зміна плеча пружної сили головної пружини призводить до високої механічної чутливості системи – отже, вона є пружно-астазованою.

Вимірювання приросту сили тяжіння проводиться компенсаційним способом. За допомогою вимірювальної пружини 14 стержень важеля 1 приводиться в горизонтальне положення за допомогою вимірювального мікрометричного пристрою 15. З його допомогою стискається або розтягується вимірювальна пружина. Наприклад, якщо сила тяжіння збільшилася, стержень важеля відхиляється вниз, то за допомогою мікрометричного пристрою верхній кінець пружини переміщається нагору і пружина розтягується, повертає вимірювальну рамку і за допомогою ниток 5 приводить важіль у вихідне горизонтальне положення. Фіксується нульове положення важеля за допомогою спеціального пристрою. Разом з важелем системи повертається вертикальний відросток 13 з тонким горизонтальним стержнем 23 на кінці – рухливим індексом. Цей індекс висвітлюється променем світла, що проходить від освітлювача з конденсором 24, двічі відбивається в призмі, а тінь індексу проектується на окулярну шкалу

мікроскопа 25. У ній мається центральний нерухомий індекс, з яким сполучається яскрава інтерференційна смуга рухливого індексу. Відзначимо, що мікроскоп має більше збільшення по порівнянню з гравіметром ГНУ-КС і тому більше розділення оптичної системи.

Таким чином, у процесі виміру голівка мікрометричного гвинта відлікового пристрою обертається доти, поки рухливий індекс не сполучиться з нерухомим. Вимірювальною пружиною 14 можна компенсувати зміну сили тяжіння величиною близько 100 мГал. При значній зміні поля чи при тривалому збереженні приладу приходиться перебудовувати діапазон вимірів. Діапазон перебудовується обертанням діапазонного пристрою 7. Діапазонний пристрій у гравіметрі ГНУ-КВ не наділений лічильником обертів. Тому діапазон гравіметра варто перебудовувати на вихідній точці рейсу з урахуванням передбачуваної зміни поля.

При зміні температури змінюються моменти пружних сил пружин і ниток, моменти сили тяжіння важелів, а також незначно розміри каркаса. Так що вплив температури рівнозначний зміні сили тяжіння. Оскільки кварц має чималий додатний термоеластичний коефіцієнт, то найбільшій дії температури піддається головна пружина 3, пружний момент якої більш ніж у 100 разів більше за інші пружні моменти. Так що якщо підвищилася температура, то жорсткість головної пружини зростає і під її дією важіль піднімається. При зниженні температури важіль системи опускається.

Компенсатор температури діє в такий спосіб. При підвищенні температури збільшується довжина металевої нитки 16 і, під її дією, один кінець першого температурного важелю 19 опускається, а інший - трохи піднімається. Поворот через вигнуту нитку 18 передається другому важелю 20 температурного компенсатора. Цей важіль при повороті укорочує головну пружину системи, тому що зміщує її верхній кінець вниз і вліво (рис. 1.3). Тим самим важіль системи опускається. При зниженні температури маятник системи опускається, але металева нитка коротшає і за допомогою важелів верхній кінець головної пружини 3 переміщується нагору і вправо і вплив температури компенсується. При виготовленні системи підбираються її параметри так, щоб зрівняти вплив температури на важіль і його компенсацію. При компенсації нелінійного впливу температури велику роль відіграє прогин цибулеподібної нитки 18. Прогин підбирається за допомогою пружини 22. У гравіметра з добре

підбраною системою компенсації невеликий температурний коефіцієнт. Звичайно він не перевищує 0,3 мГал на 1°C в робочому діапазоні температур.

Принципова відмінність системи гравіметра ГНУ-КВ полягає в тому, що температурний компенсатор впливає на верхній кінець головної пружини, у той час як у гравіметрі ГНУ-КС температурний компенсатор за допомогою рамки впливає на вісь обертання важеля, обертаючи її в потрібну сторону. Цей вплив призводить, як правило, до великого зсуву нуля-пункту гравіметра ГНУ-КС. У гравіметра ГНУ-КВ зміщення нуля-пункту, яке зв'язане з дією температурного компенсатора, значно менше. Крім того, у гравіметрі ГНУ-КВ підвищена механічна чутливість і зроблено більш точним фіксатор нульового положення. Усе зазначене вище привело до помітного збільшення точності цього приладу. Середньоквадратична похибка одиничного виміру з цим гравіметром складає  $\pm(0,03 - 0,05)$  мГал. У гравіметра ГНУ-КС середньоквадратична похибка одиничного виміру звичайно не менше  $\pm 0,07$  мГал [1, 3]. В гравіметрах ГНУ-КВ при зміні температури переміщується верхній кінець головної пружини і змінюється ступінь астазування, що приводить до помітної залежності механічної чутливості системи від температури.

### **1.2.3. Корпус кварцових гравіметрів**

Кварцова система гравіметрів розміщена в корпусі. Корпуси гравіметрів ГНУ-КВ і ГНУ-КС по суті не розрізняються між собою. На рис. 1.4 показаний зовнішній вигляд одного з них. Корпус гравіметра має вид вертикального циліндра 1. На верхній його панелі змонтовані: рівні 2, окуляр мікроскопа 3, освітлювач 4, відліковий мікрометричний пристрій 5. У нижній частині корпусу знаходяться три настановчих підйомні гвинти 6, за допомогою яких гравіметр нівелюється. Згідно з рис. 1.5 видно, що гравіметр складається з внутрішньої частини 1 – власне гравіметра та зовнішнього кожуха 2 з теплоізоляцією. Захищають гравіметр від зміни температури шар теплоізоляції 3, а також судина Дьюара 4. Кварцова система гравіметра поміщена в герметично закриту камеру 5, з якої відкочене повітря. На верхній платі камери закріплена кварцова система і змонтовані деталі оптичної системи, діапазонного і вимірювального мікрометричних пристроїв. До корпусу кварцової системи зверху прикріплений теплозахисний стовп 6. Через нього проходять трубки освітлювача і мікроскопа, а також мікрометричні пристрої. Для

забезпечення герметичності мікрометричні пристрої мають сільфони, що відокремлюють внутрішню вакуумну камеру від зовнішнього середовища. На верхній панелі приладу змонтовані освітлювач, окуляр мікроскопа 7, рівні 8 і відліковий пристрій 9. Він складається з лічильника цілих оборотів і лімба на мікрометричному гвинті. Лімба розділений на 100 частин, за допомогою ноніуса поворот мікрометричного гвинта відраховується з точністю до 0,001 обороту. Обертання мікрометричного гвинта перетворюється в поступальне переміщення штока, зв'язаного з вимірювальною пружиною. Таким чином зміна довжини вимірювальної пружини фіксується поворотом мікрометричного гвинта. Середня частина гравіметра закріплена в зовнішньому кожусі гумовою манжетою. Маса кварцових гравіметрів 5 – 7 кг. Корпус гравіметра наділений ручкою 10 для його переноски.

Описані вище гравіметри мають різновиди, наприклад, ГНШ – широкодіапазонний гравіметр із двома вимірювальними пружинами, що вимірює без перебудови діапазону приріст сили тяжіння порядку 500 мГал. Випускаються також наземні комбіновані гравіметри ГНК, у яких мікрометричний гвинт діапазонної пружини також наділений лічильником оборотів, так що можна фіксувати цілі обороти гвинта діапазонної пружини. З закордонних приладів до класу, що розглядається, відносяться кварцові гравіметри Уордэн, Шарп, Содин і деякі інші [1, 2].

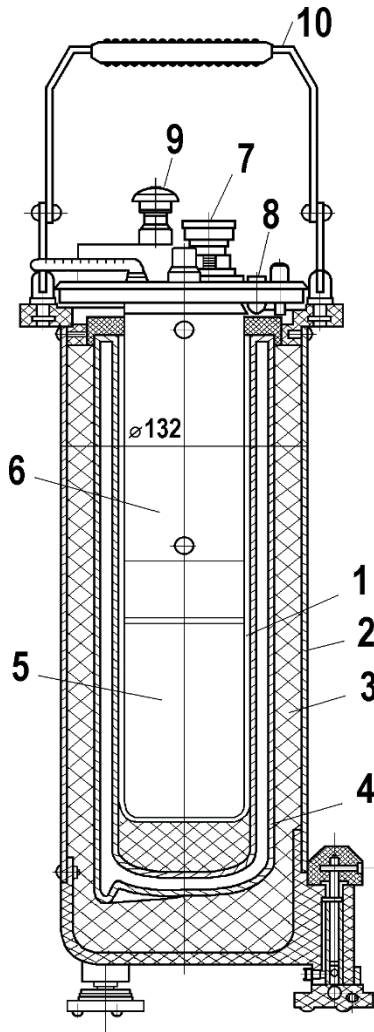


Рис. 1.4. Зовнішній вигляд кварцового гравіметра типу ГНУ [1, 3, 4]

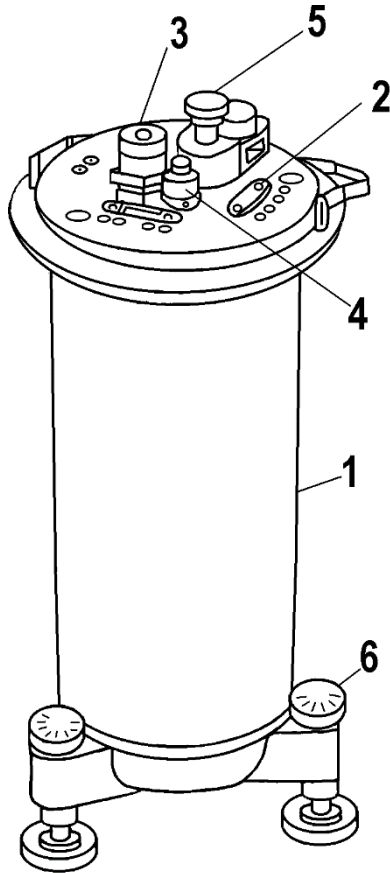


Рис. 1.5. Розріз кварцового гравіметра типу ГНУ [3]

**Завдання:**

Скласти звіт про роботу, де має бути охарактеризована ідея пружинних терезів, побудованих на принципі вертикального сейсмографа Голіцина. Описати властивості плавленого кварцу, як основного матеріалу для виготовлення кварцових пружин. Звіт доповнити рисунками систем кварцових гравіметрів ГНУ-КС і ГНУ-КВ.

# Лабораторна робота №2. Підготовка гравіметрів до польових спостережень. Частина 1 (2 год.)

**Мета роботи.** Регулювання гравіметрів і техніка роботи з ними під час зйомки

## **Теоретичні відомості**

### Загальні положення

При підготовці гравіметрів до польових спостережень виконуються наступні основні операції [3]:

- налаштування оптичної системи%
- юстирування рівнів;
- регулювання чутливості системи гравіметра%
- визначення часу становлення відліку;
- похибка одиничного виміру;
- визначення ціни поділки гравіметра (еталонування);
- визначення часу лінійного сповзання нуля-пункту.

### ***2.1. Настроювання оптичної системи***

При налаштуванні оптичної системи добиваються чіткості зображення окулярної шкали і рухливого індексу. Для освітлення в гравіметрі використовується електрична лампочка 3,5 В або 2,5 В в залежності від використовуваного живлення. Освітлювач з лампочкою змонтований на верхній панелі приладу. При заміні лампочки краще вибирати нову з прямим волоском. У цьому випадку легше домогтися гарної освітленості поля зору. Освітленість і чіткість зображення окулярної шкали і рухливого індексу регулюється зміною відносного положення лампочки освітлювача й окуляра мікроскопа. Регулювання виконується послідовним наближенням. За результатами регулювання окулярна шкала повинна бути добре освітлена, а ширина рухливого індексу не більш потроєної ширини штриха окулярної шкали. Після регулювання положення окулярної шкали і лампочки освітлювача фіксуються.

## 2.2. Юстирування рівнів (чутливість гравіметра до нахилу)

На панелі приладу розташовані два циліндричних рівні (рис. 2.1). Згідно зі схемою, поперечним називається рівень, вісь якого паралельна осі обертання важеля. Повздовжнім називається рівень, вісь якого паралельна важелю системи. Регулювання рівнів полягає в тому, щоб сумістити горизонтальне положення площини, у якій повинні лежати вісь обертання і центр ваги важеля, з нульовим положенням рівнів. Регулювання рівнів базується на основі, що момент сили тяжіння залежить від кута нахилу до горизонту осі обертання або важеля системи. Горизонтальному положенню площини, у якій знаходиться вісь обертання і центр ваги важеля, відповідає максимальний момент сили тяжіння. Це показано на рис. 2.1, а.

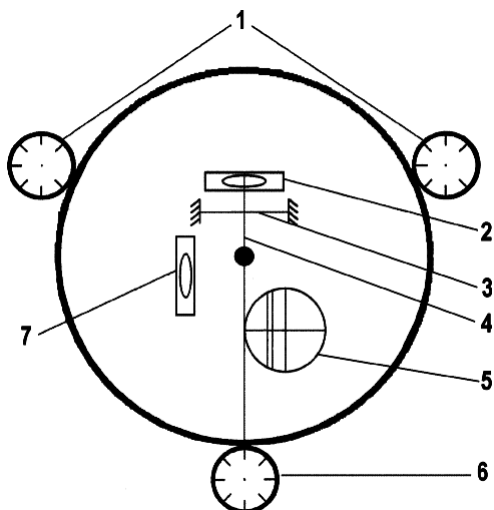


Рис. 2.1. Схема відносного положення окремих конструктивних елементів гравіметра [3, 4]. 1 – настановних гвинти поперечного нахилу, 2 – поперечний рівень, 3 – вісь обертання системи, 4 – важіль, 5 – окулярна шкала, 6 – настановний гвинт повздовжнього нахилу, 7 – повздовжній рівень.

Якщо вісь обертання нахилена на кут  $\alpha$ , то діюча сила буде вже не  $mg$ , а менше  $mg\cos\alpha$ . Також зменшується діюча сила, якщо при повздовжньому нахилі важіль приводиться не до лінії горизонту, а до

площини, нахиленої на кут  $\alpha$  (рис. 2.2, б). Так що при поперечному та повздовжньому нахилах системи гравіметра відбувається позірне зменшення сили тяжіння на величину:

$$\Delta g = g - g \cos \alpha = g(1 - \cos \alpha) = g \cdot 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \approx g \frac{\alpha^2}{2} \quad (2.1)$$

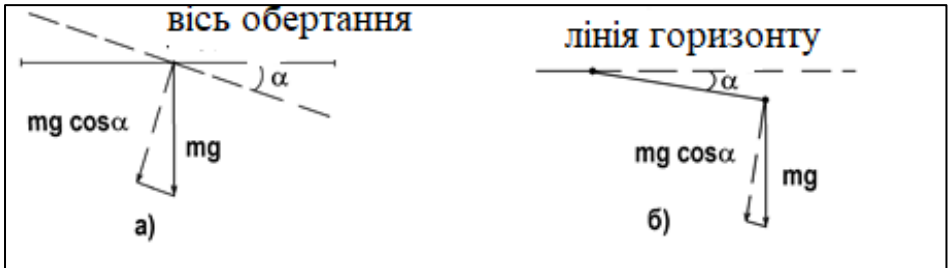


Рис. 2.2. Положення осі обертання та центру ваги важеля при горизонтальному положенні площини [4]

При невеликих кутах нахилу синусоїдальна залежність добре описується параболою. Її вершина відповідає горизонтальному положенню осі обертання або важеля.

Гравіметр установлюється на міцну основу і нівелюється. Рухливий індекс сполучається з центральним штрихом окулярної шкали і за допомогою мікрометричного пристрою береться відлік  $n_0$ . Потім для перевірки поздовжнього рівня гравіметр нахилиється від себе спочатку на 2 ділення рівня, а потім ще на 2 у ту ж сторону. При цьому нахил фіксується по положенню пухирчика. При кожному нахилі індекс системи суміщається з центральним штрихом шкали та на вимірювальному пристрої фіксуються відліки  $n_{-2}$ , і  $n_{-4}$ . По осі абсцис відкладаються значення кута нахилу  $\alpha$  (у розподілах рівня), а по осі ординат – відліки за мікрометром. Якщо за відліками  $n_0$ ,  $n_0'$ ,  $n_0''$  виявляється зсув нуля-пункту, то попередньо вводиться поправка за нуль-пункт. Графік має вид параболи. Якщо ціна поділки гравіметра від'ємна, то парабола звернена вершиною вниз (рис. 2.3). З побудованого графіка (рис. 2.3, а) видно, що мінімум параболи зміщений на 1 поділку рівня вправо. Це означає, що місце нуля рівня зміщене і для юстирування рівня його «пухирець» варто привести в нульове положення підйомними гвинтами рівня. Після корекції нульового положення рівня виконується перевірка й у разі потреби

регулювання уточнюють. Подібні регулювання часто приходиться здійснювати кілька разів послідовними наближеннями. Гравіметр повертається у вихідне положення і береться відлік  $n_0'$  (він може відрізнятись від  $n_0$  через зсув нуля-пункту). Далі гравіметр нахиляється аналогічно в іншу сторону і на кожному нахилі беруться відліки  $n_{+2}, n_{+4}$ . І знову гравіметр підйомним гвинтом виводиться у вихідне положення і для обліку можливого зсуву нуля-пункту береться відлік  $n_0''$ . **При дослідженнях повздовжнього рівня поперечний повинний постійно знаходитися в нульовому положенні!** Виконана серія вимірів дозволяє побудувати графіки залежності відліків від нахилу.

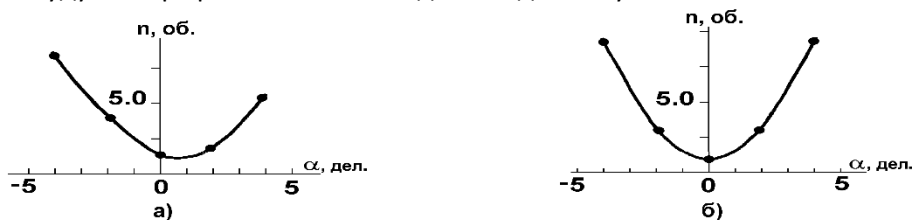


Рис. 2.3. Приклад залежності відліків гравіметра від кута його нахилу уздовж рівнів: а) подовжнього, б) поперечного [3]

Зазначеним шляхом проводиться дослідження і поперечного рівня. При цьому нахил здійснюється одночасним обертанням обох підйомних гвинтів у протилежних напрямках на однакову величину. Так що одним гвинтом корпус гравіметра піднімається, а іншим опускається. Контролем правильності погодженого нахилу за допомогою обох гвинтів є те, що «пухирець» повздовжнього рівня при цьому не зміщується. При кожному нахилі рухливий індекс суміщається з центральним індексом шкали і береться відлік по мікрометричному пристрою. Нахил робиться в одну сторону, а потім в іншу. На рис. 2.3, б) приведений побудований графік залежності відліків  $n$  гравіметра від кута його поперечного нахилу  $\alpha$ . З рис. 2.3, б) видно, що при поперечному нахилі графік практично симетричний і поперечний рівень не вимагає регулювання. Описана методика перевірки рівнів зручна для наочного вивчення.

Після набуття оператором навичок роботи з гравіметром перевірку правильності установки його рівнів можна проводити і без побудови графіка залежності відліків від нахилу. Це можна виконати в кілька етапів.

1. Гравіметр установлюється на міцній підставі, нівелюється і за

допомогою відлікового пристрою рухливий індекс системи ретельно суміщається з центральним нерухомим індексом окулярної шкали.

2. При повздовжньому нахилі одним піднімальним гвинтом «пухирець» рівня збивається в будь-яку сторону на мінімальну величину, наприклад, одну поділку. При правильній установці рівня індекс системи повинний зміститися в поле окулярної шкали у бік, що відповідає зменшенню сили тяжіння. Якщо гравіметр стосовно оператора встановлений так, як показано на рис. 2.1, то при нахилі системи індекс зміщується вправо. При нахилі в іншу сторону індекс системи також повинний піти у бік зменшення сили тяжіння на таку ж величину. Відзначимо, що при значному нахилі рухливий індекс системи завжди піде у бік зменшення сили тяжіння. Тому бажано, щоб нахил був мінімальний, але достатній для упевненого фіксування зсуву індексу.
3. Якщо при нахилі в одну зі сторін індекс іде у бік збільшення сили тяжіння, то рівень встановлений неправильно. При цьому нахиленому положенні сполучається відліковим пристроєм рухливий і нерухомий індекси. І від цього нульового положення нахилиємо гравіметр в обидва боки на мінімальну величину. Якщо в обох випадках індекс зміститься у бік зменшення сили тяжіння, то знайдене правильне положення рівня. Якщо знову при деякому нахилі індекс зміщується у бік збільшення сили тяжіння, то при цьому положенні підйомних гвинтів рухливий індекс виводиться на середину шкали і знову повторюється нахил в одну та іншу сторону. Послідовними кроками необхідно знайти таке положення настановного гвинта, при якому підйом його на мінімальну величину вгору і вниз приводить до зсуву індексу в одну й ту сторону зменшення сили тяжіння. У цьому положенні установчого гвинта пухирець рівня виправними гвинтами виводиться на середину.

Аналогічно перевіряється і поперечний рівень. Тільки нахил здійснюється двома підйомними гвинтами. Необхідно при цьому стежити за тим, щоб не сходяв «пухирець» повздовжнього рівня. Звичайно приходиться уточнювати установку рівнів послідовними наблизженнями.

Відзначимо, що описаний метод перевірки правильності установки рівнів є самим точним і його можливості визначаються тільки чутливістю гравіметра та кваліфікацією оператора.

Прийнято щодня перед початком роботи в рейсі перевіряти

правильність установки рівня. Для цього гравіметр нівелюється по рівнях і береться відлік  $n_0$  по вимірювальному пристрої. Після цього пухирець випробовуваного рівня збивається в одну сторону на два розподіли установчим гвинтом гравіметра і береться відлік  $n_2$ . Потім пухирець рівня збивається на два розподіли в іншу сторону і береться відлік  $n_{-2}$ . Якщо обидва відліки  $n_2$  і  $n_{-2}$  будуть більше відліку  $n_0$  (менше при від'ємній ціні розподілу) і приблизно однакові за величиною, то рівень встановлений правильно. Аналогічно перевіряється й інший рівень. Якщо один з відліків  $n_2$  чи  $n_{-2}$  менше  $n_0$  чи  $n_2$  і  $n_{-2}$  значно розрізняються між собою, то рівень встановлений неправильно і необхідне його юстирування, як зазначено вище.

### **2.3. Визначення і регулювання чутливості гравіметра**

Під чутливістю гравіметра розуміється відношення величини переміщення індексу по окулярній шкалі  $\Delta x$  до величини зміни сили тяжіння  $\Delta g$ . Висока чутливість дозволяє як можна точніше суміщати індекс важеля з центральним штрихом окулярної шкали. Дуже висока чутливість гравіметра незручна тим, що пружинні терези в цьому випадку є хиткими і виміри ускладнюються. Справа в тім, що підвищення чутливості супроводжується збільшенням періоду власних коливань пружинних терезів. У загальному випадку чутливість гравіметра пропорційна квадрату періоду власних коливань  $T$  системи

$$\Delta x / \Delta g \cong kT^2 \quad (2.2)$$

Це просте співвідношення дозволяє якісно оцінювати чутливість системи по періоду власних коливань  $T$ . Відзначимо, що при великій чутливості період  $T$  може досягати десятків секунд і виміри з гравіметром стають практично неможливими. Можна оцінювати чутливість гравіметра чисельно, а також регулювати її. При цьому використовується той факт, що у астазованих гравіметрів чутливість помітно змінюється, якщо приймати за нерухомий індекс різні поділки окулярної шкали. Для оцінки чутливості пропонується виконати наступні виміри з гравіметром [2, 3]. Гравіметр встановлено на міцній підставі і виключений вплив мікросейсмів і температури. Протягом декількох хвилин беруться відліки при суміщенні індексу з центральним штрихом окулярної шкали доти, поки не стабілізується зміна нуля-пункту.

Після цього береться відлік  $n_0$  при сполученні індексу з центральним штрихом окулярної шкали. Потім мікрометричним гвинтом

індекс сполучається з десятим чи будь-яким іншим штрихом окулярної шкали і береться відлік по мікрометру  $n_{10}$ . Після цей індекс сполучається з таким же індексом з іншої сторони окулярної шкали і також береться відлік  $n_{10}$ . Цикл виміру закінчується сполученням індексу з центральним штрихом взяттям відліку  $n_0$ . За відліками  $n_0$  і  $n_0'$  на центральному штриху шкали в відліки  $n_{10}$  і  $n_{-10}$  вводиться поправка за зсув нуля-пункту. Після цього чутливість системи гравіметра обчислюється за формулою:

$$\Delta x / \Delta g = \frac{1}{20} [C(n_{10}^* - n_{-10}^*)], \quad (2.3)$$

де  $C$  – ціна поділки гравіметра, а  $n_{10}^*$  і  $n_{-10}^*$  – відліки, виправлені за зміщення нуля-пункту.

Якщо чутливість системи виявляється малою, то індекс системи сполучається вже не з центральним, а, наприклад, десятим штрихом окулярної шкали в тій її стороні, куди іде індекс при збільшенні сили тяжіння. У цьому положенні системи проводиться настройка рівнів на мінімум чутливості до нахилу. Потім зазначеним способом знову визначається чутливість. Якщо вона мала, то сполучення індексу переноситься ще в ту ж сторону шкали і знову настраюються рівні на мінімум чутливості до нахилу.

Якщо чутливість системи велика й утруднює виміри, то зменшити її можна шляхом сполучення індексу системи не з центральним, а, наприклад, з десятим штрихом шкали в тій її стороні, куди іде індекс при зменшенні сили тяжіння. У цьому положенні рівні гравіметра регулюються на мінімум чутливості до нахилу. Вище відзначалося, що при регулюванні системи можна якісно оцінювати зміну її чутливості по періоду власних коливань (2.2).

#### **2.4. Визначення часу становлення відліку**

Внаслідок впливу електростатичних зарядів на систему й інших причин рухливий індекс встановлюється відповідно до величини сили тяжіння не відразу, а протягом деякого проміжку часу. Тому необхідно знати час становлення відліку  $t_{cm}$  і враховувати його при спостереженні з метою зменшення помилки спостереження. Для визначення часу становлення відліку гравіметр попередньо піддають вібрації. Звичайно, її створюють за допомогою вібраційної платформи. Але можна створити й іншим способом. Наприклад, при виконанні пішохідної зйомки з переходами між пунктами спостереження приблизно 5 хвилин для створення вібрації гравіметр переноситься також 5 хвилин у звичайному

темпі руху. Після цього гравіметр швидко встановлюється на міцній основі (з цього моменту починається відлік часу), нівелюється і береться перший відлік  $n$ . Відліки беруться щохвилини доти, поки не стабілізуються. За результатами виміру будується графік (рис. 2.4). На графіку по осі абсцис відкладається час виміру, а по вертикальній осі відлік, переведений у мілігали, тобто  $g_r = Cn$ . Перший відлік приймається за нульовий. На побудованому графіку верхня горизонтальна лінія відповідає максимальному взятому відліку. Після цього проводять ще одну лінію, яка знаходиться від першої на величину середньо - квадратичної похибки  $\epsilon_{in}$  одиничного виміру.

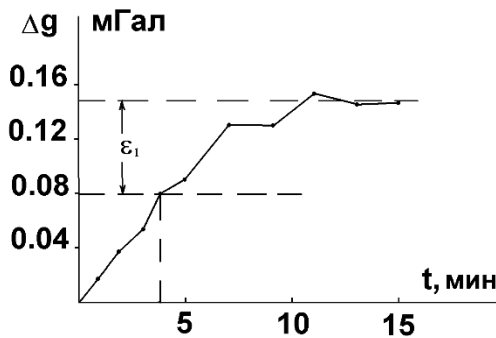


Рис. 2.4. Визначення часу становлення відліків гравіметра [3]

Нагадаємо, що для ГНУ-КС у кращому випадку вона складає 0,07 мГал, а для ГНУ-КВ – 0,03 мГал і вказується в паспорті приладу [1 - 3]. З точки перетину нижньої кривої з графіком опускаємо перпендикуляр на горизонтальну вісь і тим самим відтинаємо на ній час  $t_{cm}$  становлення відліків. Для кварцових гравіметрів цей час складає 2–3 хв. Відзначимо, що при визначенні часу становлення відліку необхідні дуже точні виміри. Інакше графік буде поламаний і визначити по ньому що-небудь неможливо. Дослідження часу становлення відліків дозволяє вибрати режим виміру з гравіметром. Тут є дві можливості. Чи брати відліки через той же час після установки гравіметра (якщо  $t_{cm}$  дуже велике) чи вимірювати після часу становлення відліку

#### Хід виконання роботи:

У лабораторній роботі здобувач виконує перевірку і при

необхідності регулювання приладу:

- перевірку і регулювання оптичної системи,
- перевірку і регулювання рівнів на мінімум чутливості відліків до нахилу,
- визначення часу становлення відліку,
- визначення і регулювання чутливості системи гравіметра.

При виконанні роботи рекомендується виконати короткий рейс із гравіметром по одній зі схем з повторенням, наприклад, за схемою повторних вимірювань в прямому ході 1-2-3-1. За результатами роботи здобувач повинен навчитися виконувати основні перевірки гравіметра і проводити з ним виміри.

**Завдання:**

скласти звіт про роботу, де мають бути представлені графіки залежності вимірів гравіметру від кута його нахилу для повздовжнього та поперечного рівнів, а також графік визначення часу становлення відліків гравіметра. Графіки доповнити таблицями результатів вимірювання.

# Лабораторна робота №3. Підготовка гравіметрів до польових спостережень. Частина 2 (2 год.)

**Мета роботи.** Навчити здобувачів визначати ціну поділки гравіметрів, середньоквадратичну похибку спостережень та визначати час лінійного сповзання нуля-пункту.

## Теоретичні відомості

### *3.1. Ціна поділки гравіметра*

Ціна поділки гравіметра (ціна одного оберту мікрогвинта вимірювального пристрою в мілігалах) визначається найчастіше методом порівнянь[3] . В найпростішому випадку необхідно мати дві точки, між якими відома різниця прискорення сили тяжіння  $\Delta g$ . На цих точках послідовно проводяться вимірювання і обчислюється різниця відліків:  $\Delta S = S_2 - S_1$ . Для врахування зміщення нуля-пункту приладу на вихідній точці проводиться повторне вимірювання  $S'_1$ . виправлена різниця відліків обчислюється за формулою:

$$\Delta S_{\text{виправл.}} = S_2 - S_1 - \frac{S'_1 - S_1}{t'_1 - t_1} (t_2 - t_1), \quad (3.1)$$

де  $t_1$  і  $t'_1$  – час першого і другого спостережень на вихідному пункті,  $t_2$  – час спостереження на другому пункті.

Ціна поділки (мГал/оберт) визначається за формулою:

$$c = \Delta g / \Delta S_{\text{випр.}} \quad (3.2)$$

В виробничих умовах ціна поділки визначається в шести рейсах з загальним числом вимірювань на менше 50 на гравіметричному полігоні, який складається з 5-7 точок і відповідає вимогам інструкції по гравірозвідці. Спостереження на пунктах полігону проводяться групою гравіметрів протягом трьох або чотирьох календарних днів з метою виключення систематичних помилок, які пов'язані з зовнішніми умовами. Гравіметричні вимірювання на пунктах полігону мають бути виконані з середньоквадратичною похибкою не менше  $\pm 0,02$  мГал.

В процесі еталонування вимірювання проводяться окремими рейсами, протяжність яких не повинна перевищувати інтервал часу приблизно лінійного зміщення нуля-пункту приладу. Зміщення нуля-

пункту приладу визначається за результатами повторних спостережень на вихідній точці рейсу. Перед початком вимірювань необхідно вивести гравіметр в робочий режим. Відлік на кожному пункті полігону слід брати після встановлення показань приладу після транспортування. Відносна середньоквадратична похибка еталонування не повинна перевищувати 0,03% для гравіметрів першого класу точності і 0,05% для гравіметрів другого класу.

### 3.2. Визначення похибки вимірювань з гравіметром

Похибка одиничного виміру є найважливішою характеристикою гравіметра, що визначає по суті методику та техніку роботи з ним. У спеціальній літературі [2, 3] описані різні методи визначення цієї величини. Для надійної оцінки похибки  $\epsilon_{in}$  потрібні тривалі за часом рейси з різною частотою повторних вимірів на пунктах.

Для вивчення характеру зміни нуля-пункту й оцінки похибки одиничного вимірювання, зазвичай, пропонується наступна схема. Виміри з гравіметром проводяться на пункті з твердою підставою через проміжок часу рівний 4 – 6 хвилинам. У проміжках між вимірами гравіметр переноситься в звичайному темпі, як це прийнято в польовому рейсі. Тривалість усього циклу вимірів не менше двох годин. Отримані середні відліки по мікрометру гравіметра шляхом множення на ціну поділки переводяться потім у мілігали. За результатами вимірів на одній точці будується у крупному масштабі залежність відліків від часу виміру (рис. 3.1).

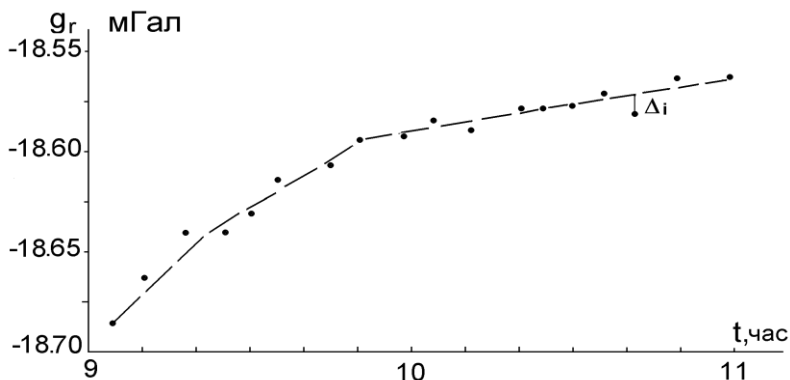


Рис.3.1 Графік зсуву нуля-пункту гравіметра в рейсі [3].

Потім графік послідовно згладжується відрізками прямих тривалістю по 30, 40, 50, 60 і т.д. хвилин з метою визначення середньоквадратичних відхилень вихідних значень від згладжених. На рис. 3.1 наведено згладжений відрізками прямих по 60 хвилин графік зміщення нуля-пункту гравіметра. Відхилення вихідних точок від згладженого графіка характеризують величину похибки вимірів при відповідній тривалості ланки рейсу.

Вона звичайно наводиться в паспорті гравіметру і залежить від його класу точності. Для перевірки цієї характеристики приладу необхідно провести багатократні (50-60 разів) вимірювання приросту сили тяжіння  $\Delta g$  між двома точками. Середньоквадратична похибка вимірювання визначається за формулою:

$$\varepsilon_0 = \pm \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n}}, \quad (3.3)$$

де  $\delta$  – відхилення окремих значень  $\Delta g$  від середнього значення приросту сили тяжіння між точками вимірювання;  $n$  - кількість визначень значень  $\Delta g$ .

Середньоквадратичну похибку вимірювань з гравіметром можна також визначити за результатами вимірювань на еталонному полігоні в процесі еталонування приладу.

### **3.3. Вивчення характеру зміщення нуля-пункту гравіметра**

Під зміщенням нуля-пункту гравіметра звичайно розуміють зміну показань приладу з бігом часу [1 - 3]. Воно пояснюється зміною у часі пружних властивостей пружин і крутильних ниток чутливої системи приладу, а також коливаннями температури та місячно-сонячними варіаціями сили тяжіння. Одночасне виявлення всіх цих причин призводить до того, що зміщення нуля-пункту відбувається, як правило, за криволінійним законом (непропорційно часу) і в різні дні має трохи різний характер.

Для вивчення типового зміщення нуля-пункту гравіметра впродовж робочого дня на одній і тій самій точці проводиться серія вимірювань з приладом. Інтервали часу між відліками мають бути приблизно рівними витратам часу на перехід з однієї точки на другу в процесі зйомки. В проміжку між вимірюваннями гравіметр транспортується в режимі зйомки.

За результатами вимірювань будується графік зміни відліків з бігом часу (рис. 3.1). В отриману криву вписується ламана лінія таким чином, щоб ланки ламаної були віддалені від кривої на відстань, яка не перевищує подвійної точності зйомки  $2\varepsilon$  (в масштабі креслення). Проміжки часу, які відповідають ланкам цієї ламаної лінії, називаються інтервалом часу приблизно лінійного зміщення нуль-пункту гравіметра. В подальшому спостереження в процесі зйомки слід планувати з таким розрахунком, щоб протяжність ланок рейсу з гравіметром не перевищувала інтервалу часу приблизно лінійного зміщення нуль-пункту гравіметра.

Гравіметр виводиться в робочий режим перед початком рейсу, а також в середині рейсу після перерви в роботі або значних порушень режиму транспортування приладу. Для контролю за виходом гравіметра в робочий режим після спостережень на вихідному опорному пункті беруться відліки на 1-2 рядових, або яких-небудь інших робочих точках, після чого спостереження на першому опорному пункті повторюються. Гравіметр вважається виведеним в режим, якщо відліки на опорному пункті розрізняються в допустимих межах (не більш ніж подвоєна точність проектної зйомки). В протилежному випадку цикл спостережень повторюють.

### **3.4. Техніка роботи з гравіметром**

Гравіметр є високоточним польовим приладом і при роботі з ним потрібно кваліфіковане і дбайливе відношення. Кварцові гравіметри безтермостатні і тому під час вимірів необхідно уважно стежити за їх температурним режимом (не допускати їх перегріву на прямому сонці). У період зйомки гравіметри зберігають в температурному режимі, близькому до польового. На ніч їх потрібно залишати в неопалюваному сухому приміщенні встановленими по рівнях на стійкій підставі з виведеним у поле зору рухливим індексом.

Щодня перед роботою перевіряється правильність установки діапазону виміру з урахуванням передбачуваної зміни поля. Наприклад, якщо в рейсі передбачається зменшення сили тяжіння на кілька десятків мілігал, то відліковий пристрій встановлюється на малі відліки на лічильнику оборотів (при від'ємній ціні поділки), а потім діапазонним гвинтом індекс виводиться на середину окулярної шкали. Необхідно також перевірити освітленість і чіткість зображення окулярної шкали й

індексу, чи справний відліковий пристрій. Так само варто перевірити правильність установки рівнів як зазначено наприкінці п. 2.1.2. Якщо гравіметр попередньо відрегульований і випробуваний, то техніка роботи з ним проста і на одиничний вимір потрібно небагато часу.

Для виміру з гравіметром вибирається відносно рівна площадка з твердою основою. В окремих випадках, коли важко вибрати площадку, наприклад, на поораному полі, спочатку встановлюється невисока металева триніа. На неї потім встановлюється гравіметр. Важко виконати виміри з гравіметром на хиткому ґрунті, наприклад, на болоті. В окремих випадках тут приходиться забивати в ґрунт коли, щоб встановити основу, на яку можна поставити гравіметр.

Система гравіметра дуже чутлива, тому рівень мікросейсмів повинний бути мінімальний. Безпосередньо поблизу точки спостереження не повинно бути працюючих механізмів і машин. Утрудняють виміри з гравіметром також мікросейсми, викликані природними причинами – сильний вітер, землетрус.

При вимірі на пункті спостереження прилад нівелюється за допомогою піднімальних гвинтів по рівнях. Підйомні гвинти гравіметра розташовані так, що двома підйомними гвинтами легко встановлюється положення «пухирця» поперечного рівня, тобто паралельно осі обертання системи, а одним піднімальним гвинтом – повздовжнього - паралельного важелю.

Виміри з гравіметром зводяться до того, що за допомогою голівки мікрометричного гвинта рухливий індекс системи сполучається з центральним штрихом окулярної шкали. Після цього береться відлік  $n$  по лічильнику обертів мікрометра. У різних типах гравіметрів цього класу відліковий пристрій може розрізнятися. Але завжди присутній лічильник цілих оборотів, на лімбі фіксуються соті частки оберту, а за допомогою ноніуса відлік уточнюється до тисячних часток, наприклад, 5,321 об. Для підвищення точності вимірів на пункті беруть, як правило, 3 відліки. Перед виконанням кожного наступного відліку підправляються (при необхідності) рівні і "збивається" відлік шляхом повороту голівки мікрометричного гвинта звичайно проти часової стрілки на  $1/5 - 1/4$  обороту. Потім обертанням голівки гвинта за годинниковою стрілкою індекс важеля підводиться до центрального штриха шкали. Треба звикнути підводити індекс з однієї і тієї ж сторони. Загальноприйняте підводити індекс системи обертанням голівки мікрометричного гвинта за

годинниковою стрілкою, тим самим одноманітно вибирається люфт гвинта. Три відліки вважаються задовільними, якщо вони мало розрізняються, не більш, ніж на декілька тисячних. На пункті спостереження заповнюється польовий журнал, куди заноситься номер пункту, час виміру  $t$ , температура приладу  $T$ , а також три відліки. З цих відліків знаходиться середнє. Після цього прилад знімається і переноситься на наступний пункт. При цьому повинна бути забезпечена схоронність приладу. Під час перевезення прилад знаходиться на руках оператора або в спеціальному амортизаторі.

**Завдання:**

Скласти звіт про роботу. Охарактеризувати процес визначення ціни поділки гравіметра та способи її визначення. За результатами власних вимірювань оцінити середньоквадратичну похибку вимірювань власного гравіметра. Представити графік визначення лінійного сповзання нуль-пункту гравіметра. Результати спостережень супроводити відповідними розрахунками та графіками.

# Лабораторна робота № 4. Обробка даних вимірювання сили тяжіння відносним гравіметром

**Мета роботи.** Вивчити методи обчислення аномалій сили тяжіння в різних редуціях, скласти каталог пунктів гравіметричних вимірів

## **Зміст роботи**

Гравіметричні виміри оброблюються з метою знаходження абсолютних значень сили тяжіння в кожному пункті мережі. Обробка гравіметричного рейсу нескладна і залежить лише від методики виміру на пунктах, яка приймається при виконанні польових гравірозвідувальних робіт.

## **Хід виконання роботи**

1. Отримати таблицю даних з польового журналу спостережень з гравіметром
2. Обчислити середній відлік мікрометра на кожній точці рейсу.
3. Розрахувати відносне значення сили тяжіння (у відліках мікрометра). Для розрахунків використати формулу:

$$\Delta a_i = a_i - a_1, \quad (4.1)$$

де  $a_i$  – середній відлік мікрометра на  $i$ -тій точці,  
 $a_1$  – середній відлік мікрометра на опорному гравіметричному пункті (ТОЧКА № 1).

4. Обчислити відносне значення сили тяжіння  $\Delta g$  (мГал) за формулою:

$$\Delta g = \Delta a_i * C, \quad (4.2)$$

де  $C$  – ціна поділки гравіметра.

5. Визначити поправку за сповзання «0» - пункту за формулою:

$$P_i = \frac{(g_k - g_1) - C(a_k - a_1)}{t_k - t_1} \cdot (t_i - t_1), \quad (4.3)$$

де  $g_1$  та  $g_k$  – абсолютні значення сили тяжіння відповідно на першій (1) та кінцевій ( $k$ ) точках опорних гравітаційних пунктах (ОГП),

$t_k - t_1$  та  $t_i$  – значення часу вимірювання сили тяжіння відповідно на першій (1), кінцевій (к) точках опорних гравітаційних пунктах (ОГП) та в поточних точках вимірювань (i),

$a_k - a_1$  – відносні значення сили тяжіння відповідно на першій (1) та кінцевій (к) точках опорних гравітаційних пунктах (ОГП)

6. Розрахувати сумарну поправку в кожній точці ( $\Sigma_{спі}$ ) за формулою:

$$\Sigma_{спі} = \Delta g + P_i \quad (4.4)$$

7. Розрахувати сумарне значення  $g_{сп}$  сили тяжіння в кожній точці за формулою:

$$g_{сп} = \Sigma_{сп} + g_1 \quad (4.5)$$

8. Для рядових точок гравіметричного рейсу (стовпчик 11) провести інтерполяцію даних нормального значення сили тяжіння  $\gamma_0$ . по профілю.

9. За даними висотних спостережень (стовпчик 10) обчислити редукцію Фая (поправка за вільне повітря):

$$P_{\Phi} = -0,3086 * H. \quad (4.6)$$

1. Обчислити редукцію Буге для кожної рядової точки, користуючись формулою:

$$P_B = (0,3086 - 0,0419\sigma)H, \quad (4.7)$$

приймаючи густину проміжного шару  $\sigma=2,67\text{г/см}^3$ .

2. Розрахувати аномалію Фая:

$$\Delta g_{\Phi} = g_{сп} - \gamma_0 + P_{\Phi}. \quad (4.8)$$

3. Визначити аномалію Буге з урахуванням поправки за вплив рельєфу місцевості за формулою:

$$\Delta g_B = g_{сп} - \gamma_0 + P_B + P_{\text{рел.}}$$

13. За результатами обчислень поправок і аномалій гравітаційного поля побудувати графіки  $g_{сп}$ ,  $P_{\Phi}$ ,  $P_B$ ,  $\Delta g_{\Phi}$  і  $\Delta g_B$ , що мають супроводжуватися табличними розрахунками. Результати обчислень аномальних значень сили тяжіння занести в таблицю.

Таблиця 4.1. Розрахунок спостережених і аномальних значень сили тяжіння

№	№ точки	Час (год., хв.)	Відлік за мікрометром	Середній Відлік	Різниця за мікрометром	Різниця відліків в мГал	Поправка за «0-пункт»	Сумарна поправка	$\Delta g_{сп.}$	Висота пункту	Нормальне значення сили тяжіння	Поправка за вплив рельєфу місцевості ( $\sigma=2,67$ г/см <sup>3</sup> )
1	2	3	4	5		6	7	8	9	10	11	12
1	ОГП-15	11,10	4,568 4,569 4,571						89,57			
2	100	11,12	4,573 4,572 4,570							184,22	980093,24	0,52
3	102	11,15	4,627 4,628 4,625							183,27		0,56

# Лабораторна робота №5. Якісна інтерпретація гравітаційних аномалій

**Мета роботи.** Ознайомлення з основними положеннями якісної інтерпретації польових гравіметричних досліджень, вивчення структури поля, пояснення природи аномалій аномального гравітаційного поля, районування ділянки, набуття навичок виділення тектонічних порушень.

## Теоретична частина

### Геологічне тлумачення гравітаційних аномалій включає:

1. Аналіз закономірностей їх розподілу на земній поверхні та поблизу неї;
2. Зв'язку закономірностей з геологічними факторами;
3. Використання цих зв'язків для вирішення геологічних задач.

В кожному конкретному випадку інтерпретація пов'язана з певним етапом геологічного дослідження певного району або ділянки.

Сутність інтерпретації гравітаційних аномалій полягає у вирішенні конкретних геологічних задач, що вирішуються на даному етапі геологічних досліджень, спираючись на дані гравітаційної зйомки, результати попередніх геолого-геофізичних досліджень, а також на досвід гравітаційних зйомок в подібних за геологічною будовою районах.

**Якісна інтерпретація гравітаційних аномалій** фактично обмежується встановленням ймовірного місцерозташування в плані тих або інших структурних елементів (куполів, антиклиналей, розломних зон або окремих розломів, рудних тіл).

Особливо важливим є той факт, що висновки, зроблені за результатами геологічної інтерпретації гравітаційних аномалій, мають, як правило, не абсолютний, а умовно-ймовірнісний зміст.

Якісна інтерпретація гравітаційних аномалій здійснюється у будь-яких випадках, тобто для зйомок будь-якого масштабу та цільового призначення, з обов'язковим залученням даних про геологічну будову ділянки або району робіт.

### **Під час якісного тлумачення встановлюються:**

1. ймовірні геологічні фактори, що впливають на аномальне гравітаційне поле, а також на результати інших геофізичних методів, які застосовувалися на ділянці робіт;
2. місцерозташування геологічних структурних елементів або рудних тіл, наявність яких можна передбачити за результатами проведених гравітаційних робіт;
3. райони або ділянки, де в зв'язку з тою або іншою геологічною задачею, необхідна постановка більш детальних гравірозвідувальних або інших геофізичних робіт;
4. точки і ділянки для закладання бурових свердловин з метою перевірки або уточнення висновків, що були зроблені за даними гравірозвідувальних робіт;
5. можливість і доцільність кількісної інтерпретації гравітаційних аномалій.

Можна вказати, в загальному плані, такі чотири основні різновиди геологічних факторів, що обумовлюють наявність і характер гравітаційних аномалій [1] :

1. **Будова товщі осадових порід.** Присутня фактично скрізь, за винятком кристалічних щитів. Як правило вона неоднорідна за густинними властивостями, границі розділу густин нерідко залягають негоризонтально, присутня також шарувата зональність густини. Все це нерідко обумовлює на земній поверхні наявність тих або інших гравітаційних аномалій. В районах з потужною товщею осадових порід, яка диференційована за густиною та характеризується наявністю різко виражених структурних форм із значною амплітудою, ці структури можуть обумовлювати досить інтенсивні (десятки мілігал) гравітаційні аномалії.
2. **Рельєф поверхні кристалічного фундаменту.** Кристалічні породи більш щільні, ніж осадові, що призводить до того, що рельєф поверхні фундаменту здійснює помітний, а в більшості випадків, визначний вплив на гравітаційне поле.
3. **Внутрішня будова кристалічного фундаменту.** Породи фундаменту значно різняться за густиною, тому внутрішня будова фундаменту обумовлює на денній поверхні наявність багаточисельних інтенсивних гравітаційних аномалій. Ефект петрографічної і густинної неоднорідності фундаменту досить значний на ділянках, де фундамент

залагає на відносно малій глибині (до 2-ох км) і представлений породами, які інтенсивно дислоковані, і навпаки.

4. **Глибинна будова земної кори.** Ефект неоднорідної глибинної будови земної кори досить інтенсивно проявляється в тектонічно активних областях (геосинклінали, активізовані платформні ділянки). В цих районах він є основним фактором, що визначає характер аномального гравітаційного поля. В суто платформних районах ефект глибинної будови земної кори проявляється відносно слабо і в найбільш стабільних районах, на докембрійських щитах, майже цілком відсутній в аномальному гравітаційному полі.

Гравітаційний вплив кожного з розглянутих факторів істотно залежить від загальних геологічних умов ділянки робіт. В деяких випадках вплив якого-небудь фактору є досить значним, в інших – досить малим. Проте в більшості випадків ці геологічні умови вже відомі, що дозволяє мати надійну загальну уяву про основні за значенням фактори, що створюють аномалії на ділянці досліджень.

Співставлення гравітаційних і геологічних карт не завжди дає надійну основу для інтерпретації: нерідко гравітаційна карта вказує розташування аномалій, які не узгоджуються з контурами структур, які виділені за геологічними даними. Можливий і інший випадок – аномалії за місцезнаходженням узгоджуються зі структурами, проте знак аномалій не відповідає характеру структур, наприклад, підняття щільних порід відповідає не максимум, а мінімум сили тяжіння. В усіх подібних випадках основний характер гравітаційного поля визнається не близькими до поверхні горизонтами порід, а будовою більш глибоких горизонтів земної кори.

Якісна інтерпретація гравітаційних аномалій неможлива без результатів інших геофізичних методів.

Найчастіше гравірознавчі роботи проводяться паралельно з магніторозвідувальними. При цьому необхідно пам'ятати, що якщо гравітаційна і магнітна аномалії викликані одним і тим геологічним утворенням, то вони звичайно не зовсім співпадають за місцезнаходженням, розмірам, а іноді відрізняються досить істотно. Це пояснюється різною аналітичною природою цих аномалій.

Істотно уточнює уяву про геологічну природу гравітаційних аномалій їх співставлення з результатами сейсморозвідки і електророзвідки, які проводилися на території гравірознавчих робіт.

В більшості випадків вони вказують на зв'язок гравітаційних аномалій з тими або іншими структурами – підняттями або прогинами фундаменту, з тектонічними порушеннями, з рудними родовищами (метод комбінованого електропрофілювання і природного поля).

В загальному плані при якісній геологічній інтерпретації гравітаційних аномалій надається опис виявлених аномальних зон і окремих характерних аномалій, приводиться ймовірна геологічна природа представлених аномалій.

При якісному аналізі карт гравітаційного поля перш за все визначають їх загальний характер:

1. наявність компонент, що повільно змінюються – регіональних полів;
2. наявність змінної частини поля – локальні аномалії;
3. наявність ділянок з приблизно однаковою будовою локальних аномалій;
4. ступінь складності локального поля на кожній ділянці.

Регіональні аномалії охоплюють значні площі (десятки та сотні тисяч кв. км) та обумовлені крупними утвореннями в земній корі та верхній мантії. Вони проявляються в тенденції ізоліній поля до витягування в певному напрямку та в систематичній зміні величин, що характеризують поля в цьому напрямку. В ортогональному напрямку ці поля звичайно змінюються плавно.

Локальні аномалії проявляються, як правило, в таких формах:

1. наявність систем замкнених ізоліній з одним або декількома відносними максимумами або мінімумами;
2. наявність локальних варіацій (згинів) в ході ізоліній;
3. наявність згущення ізоліній (зони підвищеного градієнту).

За своєю морфологією локальні аномалії звичайно підрозділяються на ізометричні та лінійні. Перші характеризуються концентричним характером ізоліній, лінійні – паралельним розташуванням з різкою зміною форми в області замикання.

Висновки про джерела аномалій базуються на наступних принципах:

1. Наявність аномалій з відносним максимумом свідчить про наявність надлишкових мас – присутності аномального тіла з додатною

ефективною густиною та, навпаки, наявність аномалій з відносним мінімумом – про наявність дефекту мас.

2. Найбільші за абсолютною величиною значення аномалій спостерігаються, як правило, поблизу проєкцій центрів тіл на денну поверхню. Лінії найбільш швидкої зміни поля (найбільші за абсолютною величиною градієнтів поля) наближено відповідають боковим межах аномальних об'єктів.

3. Простягання аномалій відповідає простягання тіл, що їх збурюють; ізометричні аномалії відповідають тілам з ізометричною проєкцією на денну поверхню.

4. Наявність симетрії на графіках поля вздовж напрямків, що перпендикулярні простяганням ізоліній свідчать про симетричний розподіл густинних мас відносно вертикальної площини, що проходить через точку максимуму (або мінімуму) графіка. Асиметрія графіка свідчить про асиметрію в розподілі мас.

5. Складна конфігурація ізоліній в плані, особливо наявність декількох екстремумів, свідчить про присутність декількох, досить близько розташованих аномальних тіл.

### **Якісна інтерпретація (практична частина)**

Це аналіз аномалій з метою їх опису та районування, визначення геологічної природи об'єктів, що створюють аномалії, вибору та підготовки аномалій для кількісної інтерпретації.

Проведення якісної інтерпретації вимагає наявності наступних даних:

1. Карти ізоліній спостереженого гравітаційного поля.
2. Геологічна карта ділянки та опорні геологічні розрізи.
3. Дані про густинні властивості гірських порід ділянки.

### **Опис та районування поля**

Основною задачею цього етапу є створення уяви про основні особливості поля, які, як правило, пов'язані з геологічною будовою ділянки робіт. При цьому спочатку виділяють найбільш крупні по площі його неоднорідності (аномальні області), які розрізняють між собою за інтенсивністю та знаком поля, за його звивистістю та контрастністю, за градієнтом, за переважним напрямком аномалій та їх формі. В межах цих областей, якщо можливо, виділяються та описуються по вищезгаданим

ознакам найбільш характерні аномальні зони або окремі аномалії. При описі всіх виділених областей, зон та окремих аномалій обов'язково вказують:

1. Площу, яку вони займають.
2. Форму, простягання, довжину та ширину.
3. Переважний знак фізичного поля.
4. Екстремальні та середні значення полів.

При описі полів зручно застосовувати їх літерну або цифрову індексацію.

За результатами приведеного опису поля ділянки складається схема районування. На цій схемі все поле за допомогою відповідних умовних позначень розбивається на ряд областей і зон, що характеризуються певним набором вищезазначених ознак. В процесі якісної інтерпретації аномалій можна отримати відомості про розміри, форму та положення в просторі геологічних тіл, що створюють ці аномалії. При цьому керуються вище зазначеними умовностями:

1. Форма геологічних об'єктів оцінюється за формою аномалій: ізометричним аномаліям відповідають об'єкти типу сфери або вертикального кругового циліндру (штоку), а витягнуті, лінійні аномалії – об'єктам типу пласта або горизонтального кругового циліндру.

2. Якщо поле різко мінливе та представлено рядом вузьких піків, то це свідчить про невелику глибину залягання тіла. Окремі піки можуть бути пов'язані з окремими частинами тіла: або з більш магнітною ділянкою, або з виступами на верхній кромці тіла. Якщо аномалія має плавний характер та значні по площі розповсюдження, то вона, ймовірно, пов'язана з глибоко розташованим об'єктом.

Розривні порушення виділяються за різкою зміною середнього рівня поля, за порушенням кореляції аномальних осей, за ділянками «пережимів» аномальних зон, за наявністю лінійних аномальних зон додатного або від'ємного знаків. За результатами аналізу схема районування наповнюється геологічним змістом і на її основі складається головний звітний документ якісної інтерпретації – схема інтерпретації, на яку виноситься вся геологічна інформація, яка отримана за результатами польової зйомки.

***Завдання:***

Провести якісну інтерпретацію наданого фрагменту карти аномального гравітаційного поля за наведеною вище схемою. Охарактеризувати основні аномалії ділянки, представити схему тектонічних порушень. Оформити звіт про виконані дослідження.

# Лабораторна робота №6. Пряма задача гравіметрії для тіл правильної геометричної форми. Кількісний аналіз гравітаційних аномалій

**Мета роботи:** Поглиблене ознайомлення з характерними особливостями поведінки аномалій гравітаційного поля, які обумовлені модельними об'єктами правильної геометричної форми

## **Основні теоретичні положення**

### **6. Про можливість виконання кількісного геологічного тлумачення гравітаційних аномалій**

Можливість кількісних розрахунків (інтерпретації) гравітаційних аномалій, звичайно, у практичних умовах обмежується рядом умов. Головними серед них є [1, 3]:

1. Наявність досить подрібненої геологічної інформації про район або ділянку досліджень, яка дозволяє при виконанні нижче вказаних умов, сформулювати фізичну модель геологічного середовища, що придатна для цілей інтерпретації гравітаційних аномалій.

2. Різка перевага впливу якої-небудь однієї з геологічних ознак (фактору) на аномальне гравітаційне поле над впливом інших факторів. Для виконання цієї умови досить часто застосовують трансформації аномалій. Виконання цієї умови дає у ряді випадків можливість зробити при інтерпретації припущення, що аномалія, яка досліджується, на певній ділянці обумовлена дією тільки одного геологічного тіла.

3. Витриманість фізико-геологічних умов (розподіл густини, умови залягання гірських порід і т.п.), що дозволяє для всіх однотипних аномалій у межах території досліджень застосовувати однакові прийоми інтерпретації.

4. Велика детальність і висока точність гравітаційної зйомки. Під цим в теорії інтерпретації розуміють, що досліджувана гравітаційна аномалія відома як більш точно і при цьому в будь-якій точці профілю, який її перетинає. При інтерпретації, як правило, використовують горизонтальні координати точок нульових значень, максимуму, мінімуму і т.д. аномальної кривої чи кривих, числові значення максимуму і мінімуму і т.д. Тому при використанні даних зйомки, яка проводиться через кінцевий інтервал, необхідно, щоб цей інтервал був досить малим, як

правило, в декілька разів менше глибини залягання аномального тіла. Друга умова – висока точність зйомки.

5. Наявність відповідної теорії інтерпретації гравітаційних аномалій, яка добре пристосована до реальних геологічних умов та задач, які ставляться перед гравіроздаю.

### **6.1. Фізична модель геологічного середовища**

Фізична модель геологічного середовища – це деяка спрощена схема середовища, яка дозволяє проводити інтерпретацію геофізичних даних і при цьому зроблені при її побудові спрощені припущення хоча і представляють нерідко істотне відхилення від реальних умов, проте не обумовлюють великих похибок при інтерпретації. Під час інтерпретації гравітаційних аномалій найчастіше використовують наступні спрощуючі припущення :

1. Можливість зведення задачі інтерпретації до двовимірної, тобто, аномалії, що досліджуються, обумовлені нескінченно витягнутими тілами з постійним поперечним перерізом. Це припущення веде до значного спрощення всіх обчислювальних операцій при інтерпретації.

2. Про постійну надлишкову густину геологічних тіл, які викликають гравітаційні аномалії. Ця умова в деяких випадках досить задовільно відповідає реальним умовам, іноді є тільки досить грубим наближенням до реальності. Проте припущення про постійну надлишкову густину значно спрощує і полегшує інтерпретацію.

3. При інтерпретації аномалій градієнту сили тяжіння у випадку двовимірної задачі нерідко робиться припущення про нескінченне розповсюдження збурюючих тіл на глибину.

4. Досить часто робиться припущення про те, що геологічні тіла, які викликають гравітаційні аномалії, мають правильну геометричну форму, яка наближено відповідає дійсній.

### **6.2. Пряма задача гравіметрії для тіл правильної геометричної форми**

Визначення значень гравітаційного потенціалу та його похідних для тіла заданої форми, розмірів і густини в точках, які знаходяться за межами тіла, називається прямою задачею гравіметрії. Пряма задача гравіметрії має єдиний розв'язок. Для більшості тіл правильної геометричної форми, які однорідні за густиною, пряма задача вирішується аналітично. Складні по формі або за розподілом мас тіла розбивають на

окремі частини таким чином, щоб їх вплив можна було визначити аналітично, враховують сумарний вплив частин тіла та знаходять поле, яке спричинене цим тілом.

Розподіл по профілю аномалій сили тяжіння або аномальних значень других, третіх похідних гравітаційного потенціалу зображують у вигляді кривих  $\Delta g, V_{xz}, V_{zz}, V_{\Delta}, V_{zzz}$ . Кривим  $\Delta g, V_{xz}, V_{zz}, V_{\Delta}, V_{zzz}$  над тілами різних геометричних форм притаманні деякі особливості, які в деяких випадках характерні лише для тіл цих форм.

Гравітаційний вплив сфери в точках зовнішнього простору еквівалентний дії точкової маси, яка дорівнює масі  $M$  сфери і розташована в її центрі. В прийнятій у задачі системі координат  $r = \sqrt{x^2 + h^2}$ . Поклавши, що центр сфери лежить на осі  $Z$  на глибині  $h$ , радіус сфери дорівнює  $r$ , її густина  $\sigma'$ , а густина уміщуючих порід  $-\sigma_0$ , отримуємо гравітаційний вплив сфери в точках осі  $X$  за наступними формулами:

$$\begin{aligned}\Delta g &= GMh/(x^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}, \\ V_{xz} &= -3GMhx/(x^2 + h^2)^{\frac{5}{2}} \\ V_{\Delta} &= V_{yy} - V_{xx} = -3GMx^2/(x^2 + h^2)^{\frac{5}{2}} \\ V_{zz} &= GM(2h^2 - x^2)/(x^2 + h^2)^{\frac{5}{2}} \\ M &= \frac{4}{3}\pi r^3(\sigma' - \sigma_0)\end{aligned}$$

### Горизонтальний матеріальний стержень

Гравітаційна дія нескінченно довгого (по осі  $y$ ) горизонтального матеріального стержня на глибині  $h$  визначається за формулами:

$$\begin{aligned}\Delta g &= \frac{2G\lambda h}{(x^2 + h^2)}; \\ V_{xz} &= -\frac{4G\lambda xh}{(x^2 + h^2)^2}; \\ V_{zz} &= V_{\Delta} = \frac{2G\lambda(h^2 - x^2)}{(x^2 + h^2)^2}; \\ V_{zzz} &= \frac{4G\lambda h(h^2 - 3x^2)}{(x^2 + h^2)^2}.\end{aligned}$$

де  $\lambda$  – лінійна густина тіла (кг/м).

### Горизонтальний круговий циліндр

Формули, що визначають аномальне гравітаційне поле горизонтального кругового нескінченного циліндру мають вид:

$$\Delta g = \frac{2G\pi\sigma R^2 h}{(x^2 + h^2)};$$

$$V_{xz} = -\frac{4G\pi\sigma R^2 xh}{(x^2 + h^2)^2};$$

$$V_{zz} = V_{\Delta} = \frac{2G\pi\sigma R^2 (h^2 - x^2)}{(x^2 + h^2)^2};$$

$$V_{zzz} = \frac{4G\pi\sigma R^2 h(h^2 - 3x^2)}{(x^2 + h^2)^2}.$$

### Вертикальний матеріальний стержень

Гравітаційний вплив вертикального матеріального стержня, що розташований на осі  $z$  на глибині від  $h_1$  до  $h_2$  визначається в точках осі  $x$  за формулами:

$$\Delta g = G\lambda \left[ \frac{1}{\sqrt{x^2 + h_1^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + h_2^2}} \right],$$

$$V_{xz} = G\lambda x \left[ \frac{1}{(x^2 + h_2^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{1}{(x^2 + h_1^2)^{\frac{3}{2}}} \right],$$

$$V_{zz} = G\lambda \left[ \frac{h_1}{(x^2 + h_2^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{h_2}{(x^2 + h_1^2)^{\frac{3}{2}}} \right],$$

$$V_{zzz} = G\lambda \left[ \frac{(x^2 - 2h_2^2)}{(x^2 + h_2^2)^{\frac{5}{2}}} - \frac{(x^2 - 2h_1^2)}{(x^2 + h_1^2)^{\frac{5}{2}}} \right].$$

В даному випадку  $\lambda$  – лінійна густина тіла (кг/м).

### Вертикальний скид

Формули для притягання  $\Delta g$  і горизонтальних градієнтів сили тяжіння, що викликані уступом мають такий вигляд:

$$\Delta g = G\sigma \left[ \pi(z_1 - z_2) + 2z_2 \arctg \frac{x}{z_2} - 2z_1 \arctg \frac{x}{z_1} + x \ln \frac{x^2 + z_2^2}{x^2 + z_1^2} \right],$$

$$W_{xz} = G\sigma \ln \frac{x^2 + z_2^2}{x^2 + z_1^2}.$$

### Горизонтальна матеріальна смуга

Гравітаційна дія матеріальної горизонтальної смуги, що має ширину  $l$ , нескінченне простягання в напрямку осі  $u$ , довга вісь якої лежить в площині  $uOz$  на глибині  $z$  визначається за формулами:

$$\Delta g = 2G\lambda \left[ \operatorname{arctg} \frac{l-x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{l+x}{z} \right],$$

$$W_{xz} = -2G\lambda z \left[ \frac{1}{(l-x^2) + z^2} - \frac{1}{(l+x^2) + z^2} \right],$$

$$W_{zz} = W_{\Delta} = 2G\lambda \left[ \frac{x+l}{(x+l)^2 + z^2} - \frac{x-l}{(x-l)^2 + z^2} \right],$$

$$W_{zzz} = 4G\lambda z \left[ \frac{x+l}{[(x+l)^2 + z^2]^2} - \frac{x-l}{[(x-l)^2 + z^2]^2} \right]$$

Завдання:

1. Вміти виводити аналітичні вирази параметрів аномального гравітаційного поля для об'єктів правильної геометричної форми;
2. Виконати кількісні розрахунки необхідних параметрів гравітаційного поля за наданими викладачем варіантами.
3. Результати робіт представити у вигляді таблиць і графіків  $\Delta g$  та її похідних для різних об'єктів (в мілігалах і Етвешах).

# Лабораторна робота №7. Аналітичні методи розв'язку оберненої задачі для деяких тіл правильної геометричної форми (метод характерних точок)

Мета роботи: Поглиблене ознайомлення з методом характерних точок як одного з основних методів кількісної інтерпретації даних гравіметрії для тіл правильної форми, набуття здобувачами практичних навичок при інтерпретації гравітаційних аномалій цим методом.

В попередній лабораторній роботі були наведені формули, що визначають гравітаційний вплив ряду тіл правильної геометричної форми в точках осі  $x$ . Їх можна розглядати як рівняння деяких плоских кривих

$$\Delta g = F(x), \quad V_{xz} = \varphi(x) \text{ і т.п.}$$

На цих кривих легко відмітити характерні точки, наприклад:

1. точки максимумів і мінімумів;
2. точки перегину;
3. точки, в яких значення ординати дорівнює половині або чверті максимального значення ординати;
4. точки перетину кривої з віссю  $x$  та інші.

При розв'язку оберненої задачі для тіл правильної геометричної форми за видом кривих спочатку визначають форму тіла, що збурює. Іноді форму тіла можна встановити за однією будь-якою кривою, вид якої відповідає лише визначеній формі тіла, наприклад, за кривою  $V_{\Delta}$  – кульову форму тіла, за кривими  $\Delta g$ ,  $V_{zz}$  та  $V_{zz} = V_{\Delta}$  – вертикальний скид і т.п.

Визначивши форму тіла, використовують відповідні даному випадку співвідношення, що пов'язують абсциси та ординати характерних точок кривих з елементами, що характеризують розміри та положення тіла. Із спільного розв'язку цих рівнянь визначають розміри тіла та елементи залягання.

## Сфера

Положення проєкції центра сфери на профіль спостереження визначається абсцисою максимуму кривих  $\Delta g$ ,  $V_{\Delta}$  та  $V_{zz}$ , а також точкою перетину кривої  $V_{zz}$  з віссю  $X$ . Глибина залягання  $h$  центру сфери визначається з рівнянь:

за кривою  $\Delta g$

$$h = \pm 1,306x_{1/2};$$

за кривою  $V_{xz}$

$$h = |x_{\max}| + |x_{\min}|;$$

за кривою  $V_{\Delta}$

$$h = \pm \sqrt{3/2} x_{\min}.$$

де  $x_{\max}$  та  $x_{\min}$  – абсциси екстремальних точок відповідних кривих.

Знаючи глибину залягання, можна визначити ефективну масу  $M$  сфери:

за кривою  $\Delta g$

$$M = \frac{h^2 \Delta g_{\max}}{G};$$

за кривою  $V_{xz}$

$$M = 1.165 \frac{h^3 V_{xz\max}}{G};$$

за кривою  $V_{\Delta}$

$$M = -1.792 \frac{h^3 V_{\Delta\min}}{G}.$$

Якщо відома ефективна густина сфери, то знаючи його масу, можна визначити радіус сфери

$$R = \sqrt[3]{\frac{3M}{4\pi\sigma}}.$$

Доцільно визначати  $h$  і  $M$  по кожній з них з метою контролю.

## Горизонтальний круговий циліндр

Глибина залягання  $h$  вісі циліндру визначається з рівнянь:

за кривою  $\Delta g$

$$h = \pm x_{1/2};$$

за кривою  $V_{xz}$

$$\frac{2}{\sqrt{3}} h = |x_{\max}| + |x_{\min}|;$$

за кривою  $V_{zz}$

$$h = \frac{|x_{\min}|}{1.73}.$$

Лінійну густину циліндра  $\sigma\pi R^2$  і матеріального стержня  $\lambda$  визначають за формулами:

за кривою  $\Delta g$

$$\lambda = \sigma\pi R^2 = \frac{h\Delta g_{\max}}{2G};$$

за кривою  $V_{xz}$

$$\lambda = \sigma\pi R^2 = \frac{4h^2 V_{xz\max}}{3\sqrt{3}G};$$

за кривою  $V_{zz}$

$$\lambda = \sigma\pi R^2 = \frac{h^2 V_{zz\max}}{2G}.$$

Якщо відома ефективна густина  $\sigma$  циліндру, то можливо визначити радіус горизонтального циліндру за наведеними вище формулами.

***Завдання:***

Провести інтерпретацію гравітаційних аномалій для тіл правильної геометричної форми, скориставшись як даними попередньої роботи, так і новими даними. Порівнюючи результати розв'язку оберненої задачі з прямою, оцінити для свого власного варіанту точність інтерпретації гравітаційних аномалій в методі характерних точок. Результати представити у вигляді звіту.

## Список використаних джерел

1. *Безродний, Д.А., Безродна, І.М.* (2002). Гравіметрія (в трьох книгах) Теорія. Апаратура і методика. Застосування Київ: Навчально-науковий інститут «Інститут геології». – Режим доступу: [http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/diplom\\_spec\\_0709.pdf](http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/diplom_spec_0709.pdf)
2. *Двуліт П.Д.* (1998). Гравіметрія / Підручник. Львів: ЛАГТ, 196 с.
3. *Кошелев, І.М.* (1984, 1990) Гравірозвідка та магніторозвідка. Практикум. Київ: «Вища школа», 240 с.
4. *Torge, W.* (1989). Gravimetry. Walter de Gruyter, Berlin, New York.