

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

**ВИМІР ПОЛЯ СИЛИ ВАГИ ЗА
ДОПОМОГОЮ ГРАВИМЕТРІВ ТА
ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ
СПОСТЕРЕЖЕНЬ**
Методичні рекомендації
до лабораторних робіт
з дисципліни
«Гравірозвідка»

Дніпро
2018

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

ВИМІР ПОЛЯ СИЛИ ВАГИ ЗА ДОПОМОГОЮ ГРАВИМЕТРІВ
ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ СПОСТЕРЕЖЕНЬ
Методичні рекомендації до лабораторних робіт
з дисципліни «Гравірозвідка»

для студентів спеціальності 103 Науки про Землю
спеціалізації «Геофізика»

Дніпро
НТУ «ДП»
2018

Логвін В.М.

Вимір поля сили ваги за допомогою гравіметрів та обробка результатів спостережень: Методичні рекомендації до лабораторних робіт з дисципліни «Гравірозвідка» для студентів спеціальності 103 Науки про Землю спеціалізації «Геофізика» / В.М. Логвін; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2018. – 46 с.

Автор – В.М. Логвін, канд. фіз.-мат. наук, проф.

Затверджено до видання методичною комісією спеціальності 103 Науки про Землю (протокол № 3 від 15.03.2018).

Викладено методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Гравірозвідка» (перша частина), основною метою яких є освоєння гравіметра – прибору для вивчення поля сили ваги Землі: призначення і будова, виміри і регулювання, обробка вимірів і зображення результатів.

Відповідальний за випуск завідувач кафедри геофізичних методів розвідки М.М. Довбніч, д-р геол. наук, проф.

ВСТУП

У цьому виданні викладено методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Гравірозвідка» (перша частина), які проводяться в лабораторії гравірозвідки на кафедрі геофізичних методів розвідки.

Основною метою лабораторних робіт є освоєння гравіметрів: призначення і будова, виміри і регулювання, обробка вимірів і зображення результатів. При обробці вимірів головне – досягти розуміння визначень, використовуваних в обробці: відносні виміри, зсув нуль-пункту, похибка вимірів, їх вирівнювання, а також аномалії сили ваги в різних редукаціях. Для обчислень пропонуються прості умови, у яких досить застосування мікрокалькулятора. Але студенти, які устигають, в процесі виконання лабораторних робіт можуть використовувати доступні їм комп'ютерні засоби (Fortran, Basic, Excel та ін.). В обробці будемо слідувати відомому вислову Хеммінга Р.В.: «Мета розрахунків – розуміння, а не числа».

1. ВИВЧЕННЯ БУДОВИ КВАРЦОВИХ АСТАЗОВАНИХ ГРАВИМЕТРІВ

Мета роботи. Вивчити принцип роботи і будову приладів для виміру приросту прискорення сили ваги – гравіметрів. У даній роботі вивчаються кварцові гравіметри, які частіше широко застосовуються в гравіметричній розвідці.

1.1. Зміст роботи

1.1.1. Пружні системи гравіметрів

Усі вітчизняні і закордонні кварцові гравіметри побудовані за принципом вертикального сейсмографа Голіцина. Російський фізик і геофізик Б.В.Голіцин запропонував чуттєві пружинні системи для реєстрації вертикальних змішень ґрунту при землетрусах. З можливих систем сейсмографа Голіцина 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.

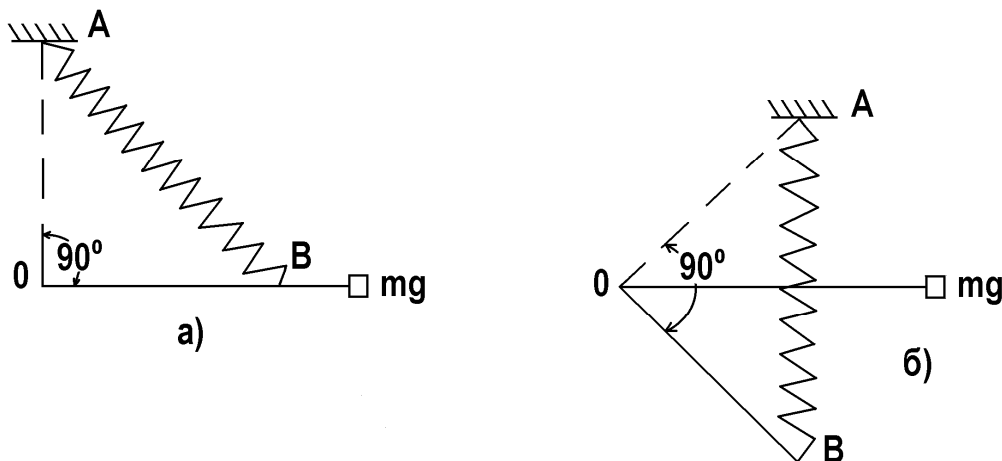


Рис. 1.1. Варіанти систем сейсмографа Голіцина

Висока чутливість систем з рис. 1.1 зв'язана з тим, що вони відносяться до класу так званих астазованих. Назва походить від слова *astatos* – нестійкий. Це означає, що системи працюють у положенні нестійкої рівноваги. Так що навіть невелика зміна сили, прикладеної до важеля, приводить до значного його переміщення, показуючи тим самим велику кутову чутливість системи.

У тридцятих роках було показано, що вертикальний сейсмограф Голіцина можна використовувати як чуттєву систему гравіметрів. Наприкінці тридцятих і сорокових років гравіметри цього типу були побудовані в США. У нашій країні кварцові астазовані гравіметри почали випускати на початку п'ятдесятих років.

1.1.2. Пружинні гравіметри

Гравіметри даного типу побудовані за принципом пружинних ваг. Так що їхнім найважливішим елементом є пружина, пружний момент якої врівноважує момент сили ваги. Відомий конструктор гравіметрів А.Граф [9] підкреслює, що якщо потрібно вимірити прискорення сили ваги g з точністю до 0.01 мГал, то пружні властивості пружини повинні бути постійними 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 повинне зберігатися з точністю 10^{-7} за проміжок часу в одну годину [9]. Дотримання настільки високих вимог до пружин даного типу гравіметрів досягається за рахунок використання спеціально оброблених кварцових пружин. Пружини з плавленого кварцу використовуються в гравіметрах уже більш 50 років.

Кварцові пружини мають наступні переваги:

- у кварцу невеликий пружний наслідок. Як відомо, пружним наслідком називають явище, коли деформація продовжується протягом більш тривалого проміжку часу, чим час прикладання або зняття навантаження. Звичайно пружний наслідок викликає зміну нуля-пункту¹. Для пружин із кварцу це виявляється в мінімальній степені через пружну післядію;
- кварц технологічний і можливе виготовлення системи без спеціальних місць кріплення нитей і пружин шляхом потовщення їхніх кінців. Система гравіметра разом з рамою представляє єдине ціле. Термічні і механічні напруги в такий спосіб зводяться до мінімуму;
- кварц має невелику питому вагу і тому прискорення, що зазнаються чуттєвою системою при транспортуванні, стають менш помітними. Це дозволяє обходитися без арретування² (закріплення, фіксації) маси і пружини при транспортуванні. Невелика маса системи гравіметра сприяє швидкому сприйняттю нею навколишньої температури, а тертя об повітря приводить до швидкого загасання її коливань. Необхідно відзначити, що система знаходиться в герметично закритій посудині, з якої відкачано повітря, так що тиск у посудині знижено до 1–8 мм рт.ст. Але середовище навіть з таким низьким тиском достатньо для демпфірування системи;

¹ Зміна нуля-пункту гравіметра – систематичне непостійність відліків у точці зі зміною часу.

² Арретування – закріплення (фіксація) чого-небудь.

- 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.

Слід зазначити, що в кварцові системи мають недоліки, а також деякі труднощі в їх виготовленні:

- у кварцу мала границя текучості, а при перегріві він змінює свою структуру й у ньому відбувається перекристалізація. Для виготовлення гарної системи необхідно високе мистецтво майстра;
- кварц крихкий, тому система гравіметра не аретується. Вона легко ламається (руйнується) при недбалому поводженні. Кварцові гравіметри вимагають дбайливого поводження при транспортуванні і роботі з ними. Різкий удар по корпусу чи падіння гравіметра, як правило, виводить систему з ладу. Звичайно, це обриви нитей і пружин, так що потрібно відновлення всієї системи;
- кварцові пружини і нитті мають досить великий термоеластичний коефіцієнт, так що змінюється їхня жорсткість при зміні температури. У кварцу позитивний термоеластичний коефіцієнт, тобто з підвищенням температури жорсткість кварцових пружин зростає. Зміна температури на 1°C приводить до деформації головної пружини, що відповідає зміні сили ваги на 110 мГал. Відповідно зміна температури системи навіть на 0.01°C призводить до помилки у вимірі сили ваги аж у 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 приводить до істотного зсуву нуль-пункту. Тому що повзучість це процес безупинної пластичної деформації під дією постійного навантаження, то в кварцових гравіметрів зсув нуль-пункту відбувається в одну сторону (індекс системи зміщується убік збільшення сили ваги). Чутливість системи постійно послабляється. Тому кварцові гравіметри через кілька років експлуатації вимагають заводської переюстировки 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» чуттєвого елемента. Для зняття зарядів у деяких типах гравіметрів використовують іонізування середовища, у якій знаходиться система, за допомогою ізотопу ^{239}Pu .

1.1.3. Будова системи гравіметрів

У спеціальній літературі довгі роки кварцові гравіметри називалися ГАК – гравіметр астазований кварцовий. Перші гравіметри маркірувалися ГАК-3М (виготовлення ленінградського заводу «Геологорозвідка») і ГАК-4М (виготовлення московського заводу «НефтеКИП»). Поліпшення конструкції

першого гравіметра привело до ГАК-ПТ, а потім ГРК-Дельта, а другого – до ГАК-7Т. На основі добре зарекомендуваної себе моделі ГАК-7Т створений гравіметр другого класу. Трохи змінилася його конструкція і назва – спочатку ГР/К2 (гравіметр розвідницький другого класу), а потім ГНУ-К2 (гравіметр наземний вузькодіапазонний другого класу). Також був розроблений кварцовий гравіметр першого класу ГНУ-К1. Зараз перший з них називається ГНУ-КС (клас С), а другий ГНУ-КВ (клас В). Гравіметр класу А ще в розробці. Усі зазначені вище гравіметри відносяться до розвідницького типу, тобто призначені для виміру приросту сили ваги на невеликій ділянці.

1.1.3.1. Гравіметр ГНУ-КС. На рис. 1.2 показана пружна система гравіметра ГНУ-КС. Як підкреслювалося вище, гравіметр цього типу побудований на принципі вертикального сейсмографа Голицина. Тут **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 негативну 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 негативної початкової довжини може регулюватися в широких межах. Ця властивість використовується як у вітчизняних, так і закордонних кварцових гравіметрах. Важіль утримується в рівновазі пружною силою головної пружини **3**, діапазонної **5**, вимірювальної **9** і силою закручування нитей підвісу **6** важеля **1**. Рух важеля обмежений декількома десятими міліметра. До важеля, що представляє кварцовий стержень, прикріплене платинове циліндричне навішення **7**, що служить для збільшення моменту мас, а також для зменшення дії електричних зарядів і прилипання маятника до обмежників **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 ваги є кут відхилення важеля від горизонту. Але в гравіметрах цей кут прямо не вимірюється, а використовується компенсаційний (нульовий) спосіб. У цьому способі вимірюється сила, що приводить важіль системи в горизонтальне положення. Компенсація зміни сили ваги 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 ниттях **12**. До рамки прикріплені нитті **6** підвісу важеля **1**. Фіксується нульове положення важеля 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.

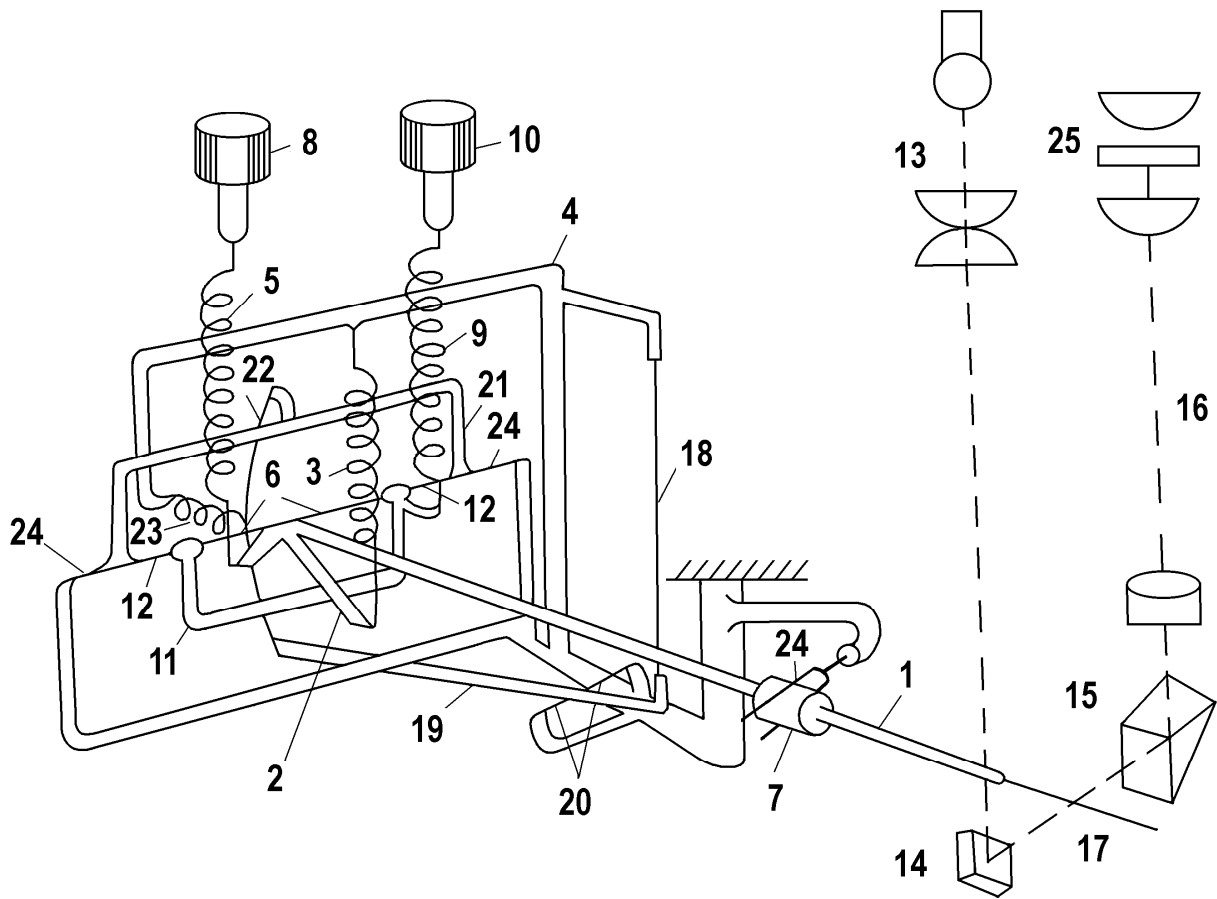


Рис. 1.2. Будова кварцевого гравіметра ГНУ-КС

Дія чуттєвого елемента системи полягає в наступному. При зміні сили ваги (приймемо, що вона збільшується) важіль системи відхиляється униз від початкового положення рівноваги доти, поки сили, викликані деформацією головної **3** і діапазонної **5** пружин і нитей підвісу важеля **6**, не зрівноважать зміну сили ваги. Головна пружина **3** з'єднана з відростком важеля таким чином, що при збільшенні сили ваги плече пружної сили зменшується, а при зменшенні сили ваги її плече зростає. Тому виникає додатковий приріст пружного моменту, що збігає за знаком зі зміною сили ваги. У зв'язку з цим невеликі зміни сили ваги викликають великі деформації головної пружини і таким чином великі кути повороту важеля. Такі пружинні ваги називаються упруго-астазованими. Для даного гравіметра, а також ряду закордонних, кутова чутливість складає 50-100" дуги на 1 мГал. Під час виміру важіль приводиться в горизонтальне положення шляхом компенсації зміни сили ваги закручуванням нитей підвісу **6** важеля. Нить закручується поворотом рамки **11** шляхом зміни розтягання 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 вузкодіапазонного гравіметра можлива компенсація вимірювальним пристроєм приросту сили ваги величиною до 100 мГал. У кварцових пружин досить вели-

кий термоеластичний коефіцієнт. Тому необхідний надійний захист системи від температурних впливів. Це досягається, насамперед, за допомогою температурного компенсатора. До нього відносяться металева нить **18**, важіль температурного компенсатора **19** (його вісь обертання **20**), рамка компенсатора **21** і прогнута нить **22**, що з'єднує важіль компенсатора з рамкою. Важіль компенсатора **19** знаходиться увесь час під дією закручених нитей підвісу. Прогин нитті **22** регулюється при виготовленні системи пружиною **23**. Дія компенсатора полягає в наступному. Нехай, наприклад, температура зростає. У кварцу позитивний 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 важеля температурного компенсатора **19** (рис. 1.2) переміститься вниз, лівий кінець нагору, прогнута нить **22** ослабне і рамка компенсатора **21** через нитті підвісу **24** опустить важіль. При виготовленні приладу зрівнюються ці дві взаємокомпенсуючі дії. Тут враховується наступна обставина. Жорсткість головної пружини при зміні температури міняється нелінійно і, таким чином, нелінійно зміниться положення важеля. У той же час подовження металевої нитті лінійне і ця лінійність в остаточному підсумку передається рамці температурного компенсатора. У розглянутому гравіметрі ГНУ-КС, як і в його попереднику ГАК-7Т, кварцова нить **22** переходу від важеля **19** компенсатора до рамки **21** прогнута для того, щоб перетворити лінійне переміщення важеля **19** компенсатора в нелінійне обертання рамки **21**, щоб компенсувати нелінійне переміщення важеля системи зі зміною температури. Юстировка температурної компенсації досягається регулюванням прогину нитті за допомогою пружини **23**. Тому в гравіметрі ГНУ-КС завдяки описаній лучковій системі компенсації, залежність відліків від температури виявляється слабо. Відзначимо, що температурний компенсатор ефективний, якщо всі деталі системи мають однакову температуру. Тому система гравіметра ретельно теплоізолювана, його варто оберігати від прямих сонячних променів і взагалі від різкого підвищення температури.

1.1.3.2. Гравіметр ГНУ-КВ. Це також кварцовий астазований вузькодіапазонний гравіметр більш високого 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 осевого стержня, до якого прикріплений горизонтальний стержень **1** із платиновим грузиком **6**. З важелем зв'язаний уже згадуваний нижній відросток **2**, а також задній відросток **8** і вертикальний Г-образний 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 вимірвальна рамка **10**. Її осями обертання служать горизонтальні нитті **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**. Температурний компенсатор гравіметра ГНУ-КВ досить складний і складається з першого **19** і другого **20** важелів. Перший важіль **19** температурного компенсатора обертається на ниттях **21**. До одного його кінця приварена металева нить **16**, а другий кінець нитті закріплений на основному каркасі **12** кварцової системи. Другий важіль температурного компенсатора **20** обертається на ниттях **17** підвісу. Один кінець його, як уже відзначалося, прикріплений до верхнього кінця головної пружини **3**, а другий – ниттю **18** з'єднаний з важелем **19** температурного компенсатора. Вигнута нить **18** відтягається пружиною **22**. Основний каркас **12** кварцової системи прикріплений до металевої підстави корпусу гравіметра.

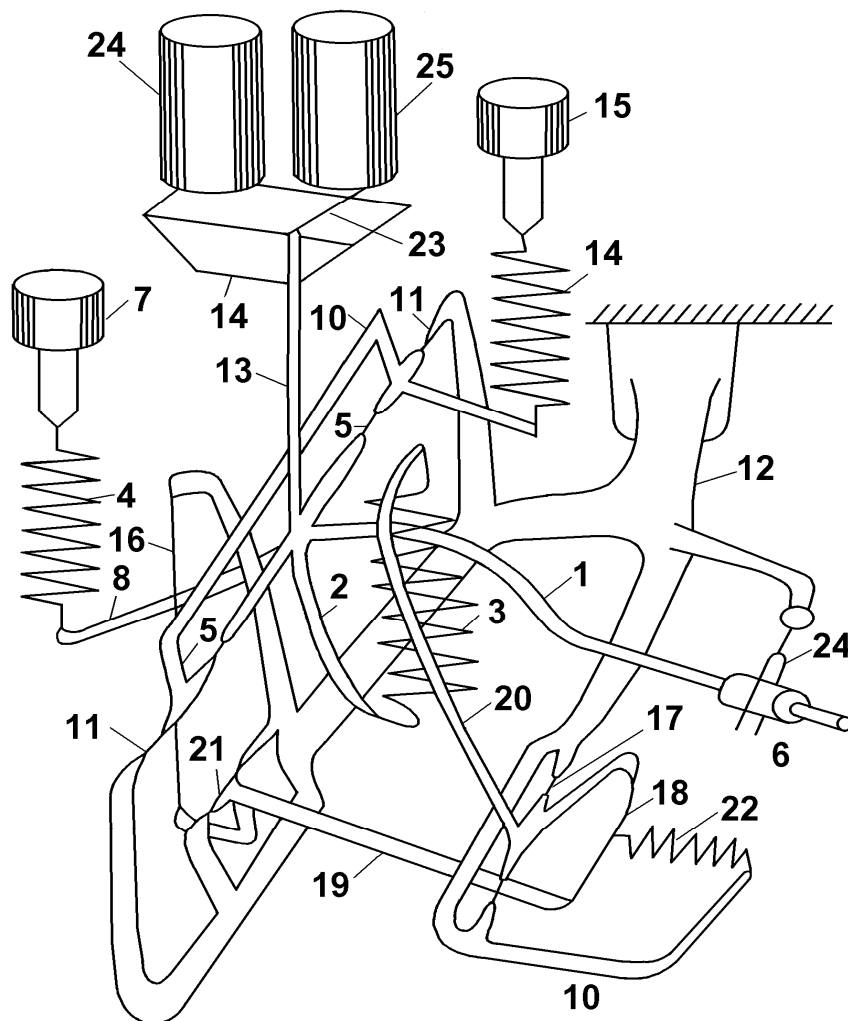


Рис. 1.3. Устрійство кварцевого гравіметра ГНУ-КВ

Система гравіметра ГНУ-КВ також відноситься до астазованих і має високу механічну чутливість до зміни сили ваги. При збільшенні сили ваги 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 ваги необхідний більший кут повороту важеля, щоб компенсувати його моментом головної пружини. При зменшенні сили ваги важіль відхиляється вгору, плече головної пружини збільшується і гравіметр одержує додаткове

зміщення на більший кут повороту. Зміна плеча пружної сили головної пружини приводить до високої механічної чутливості системи – отже, вона є упругоастазованою. Вимірювання приросту сили ваги проводиться компенсаційним (нульовим) способом. За допомогою вимірювальної пружини **14** стержень важеля **1** приводиться в горизонтальне положення за допомогою вимірювального мікрометричного пристрою **15**. З його допомогою стискується або розтягується вимірювальна пружина. Наприклад, якщо сила ваги зросла, стержень важеля

відхилився вниз, то за допомогою мікрометричного пристрою верхній кінець пружини переміщається нагору і пружина розтягується, повертає вимірювальну рамку і за допомогою нитей **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 ваги 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 оборотів. Тому діапазон гравіметра варто перебудовувати на вихідній точці рейсу з урахуванням передбачуваної зміни поля.

При зміні температури міняються моменти пружних сил пружин і нитей, моменти сили ваги важелів, а також незначно розміри каркаса. Так що вплив температури рівнозначний зміні сили ваги. Вище відзначалося, що подовження деталей із кварцу незначне, але кварц має чималий позитивний термоеластичний коефіцієнт. Тому найбільшій дії температури піддається головна пружина **3**, пружний момент якої більш ніж у 100 разів більше інших пружних моментів. 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. Нехай, наприклад, температура підвищилася. У цьому випадку збільшилася довжина металевої ниті **16** і, під її дією, один кінець першого температурного важеля **19** опустився, а іншої трохи піднявся. Поворот через вигнуту нить **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 нить коротшає і за допомогою важелів верхній кінець головної пружини **3** переміщається 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 грає прогин лукообразної ниті **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 приводить, як правило, до великого зсуву нуля-пункту гравіметра ГНУ-КС. У гравіметра ГНУ-КВ зміщення нуля-пункту, яке зв'язане з дією температурного компенсатора, вдалося помітно знизити. 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 погрішність одиничного виміру з цим гравіметром складає $\pm(0.03 - 0.05)$ мГал. У гравіметра ГНУ-КС середньоквадратична погрішність одиничного виміру звичайно не менше ± 0.07 мГал [2]. Відзначимо також, що в гравіметра ГНУ-КВ при зміні температури переміщується верхній кінець головної пружини і міняється ступінь астазування, що приводить до помітної залежності механічної чутливості системи від температури. З рис. 1.3 видно, що при підвищенні температури чутливість системи гравіметра збільшується.

1.1.4. 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 настановних піднімальні гвинти **6**, за допомогою яких гравіметр нівелюється. З розрізу на рис. 1.5 видно, що гравіметр складається з внутрішньої частини **1** – власне гравіметра і 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 теплозахитний стовп **6**. Через нього проходять труби 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. Лімб 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. Так що зміна довжини вимірювальної пружини фіксується поворотом мікрометричного гвинта. Середня частина гравіметра закріплена в зовнішньому кожусі гу-

мовою манжетою. Маса кварцових гравіметрів 5 – 7 кг. Корпус гравіметра наділений ручкою **10** для його переноски.

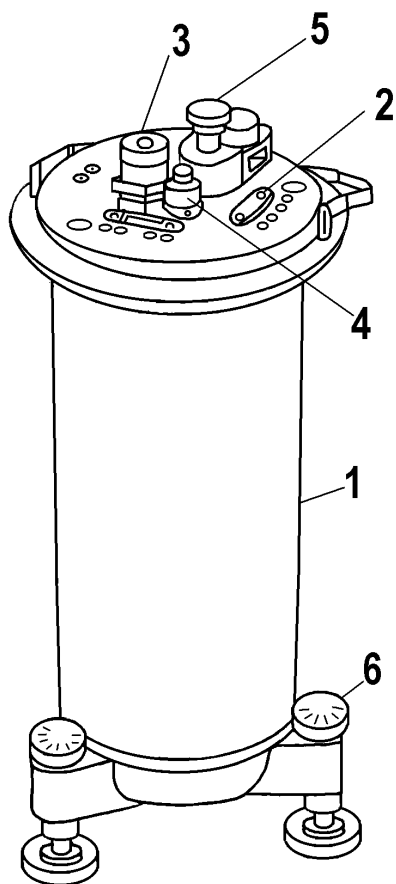


Рис. 1.4. Зовнішній вигляд кварцового гравіметра типу ГНУ

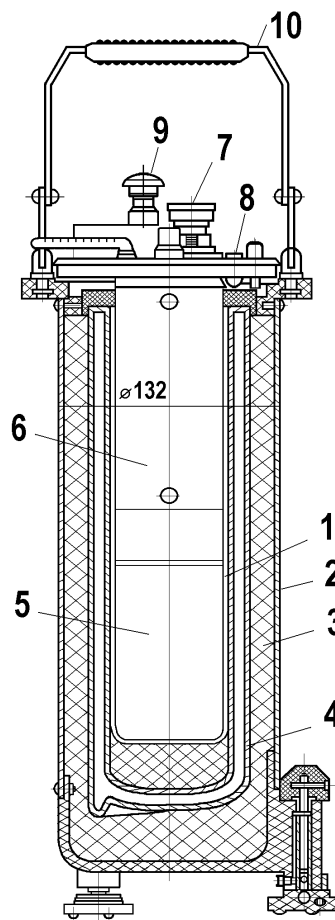


Рис. 1.5. Розріз кварцового гравіметра типу ГНУ

Описані вище гравіметри мають різновидності, наприклад, ГНШ – широкодіапазонний гравіметр із двома вимірвальними пружинами, що вимірює без перебудови діапазону приріст сили ваги 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 [2, 3, 9, 10].

1.2. Хід виконання роботи

Студенти вивчають ідею гравіметрів і їх будову на плакатах і виготовленому макеті кварцової системи. У лабораторії широко представлені різні типи кварцових гравіметрів. Вивчити їх будову можна за допомогою даних методичних вказівок і спеціальної літератури [2, 3, 8–10 і ін.].

1.3. Звіт про роботу

У зошиті для лабораторних робіт коротко пояснюється ідея пружинних ваг, побудованих на принципі вертикального сейсмографа Голіцина. Описуються властивості плавненого кварцу як матеріалу для виготовлення пружин.

Приводяться відомості про будову гравіметрів ГНУ-КС і ГНУ-КВ. Звіт ілюструється рисунками систем кварцових гравіметрів цих двох типів.

1.4. Контрольні питання

1. Чому кварц використовується як матеріал для виготовлення пружин?
2. Поясніть поняття пружина нульової чи негативної початкової довжини.
3. Дайте загальну характеристику основним системам кварцового гравіметра.
4. Які конструктивні властивості гравіметра ГНУ-КВ у порівнянні з ГНУ-КС зменшили зсув нуля-пункту і привели в кінцевому підсумку до підвищення точності виміру?
5. Назвіть усі зовнішні елементи гравіметра.
6. Яка залежність показань гравіметра від зміни температури?
7. Яким чином у кварцових гравіметрах зменшена залежність їхніх показань від температури?

2. РЕГУЛЮВАННЯ ГРАВІМЕТРІВ І ТЕХНІКА РОБОТИ З НИМИ

Мета роботи. Вивчити регулювання гравіметрів і техніку роботи з ними під час зйомки.

2.1. Зміст роботи

Кварцові гравіметри – портативні прилади, добре пристосовані до роботи в полі. В умовах експедицій для них виконуються тільки прості регулювання: настройка оптичної системи, юстировка рівнів, регулювання чутливості системи гравіметра, а також визначення часу становлення відліку, температурної характеристики, погрішності одиничного виміру і ціни ділення відлікового пристрою гравіметра (еталонування). У даній роботі розглянемо ці регулювання і визначення, крім останнього, яке винесено в окрему роботу.

2.1.1. Настроювання оптичної системи

При настроюванні 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. У результаті 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.

2.1.2. Юстировка рівнів

На панелі приладу розташовані два циліндричних рівні (рис. 2.1). Як ви-

пливає зі схеми, поперечним називається рівень, вісь якого паралельна осі обертання важеля. Подовжнім називається рівень, вісь якого паралельна важелю системи. Регулювання рівнів полягає в тім, щоб сумістити горизонтальне положення площини, у якій повинні лежати вісь обертання і центр ваги важеля, з нульовим положенням рівнів. Регулювання рівнів ґрунтується на тім, що момент сили ваги залежить від кута нахилу до горизонту осі обертання або важеля системи. Горизонтальному положенню площини, у якій знаходиться вісь обертання і центру ваги важеля, відповідає максимальний момент сили ваги. Це показано на рис. 2.2, а. Якщо вісь обертання нахилена на кут α , то діюча сила буде вже не mg , а менше $mg \cos \alpha$. Також зменшується діюча сила, якщо при подовжньому нахилі важіль приводиться не до лінії горизонту, а до площини, нахиленої на кут α (рис. 2.2, б). Так що при поперечному і подовжньому нахилах системи гравіметра відбувається удаване зменшення сили ваги на величину

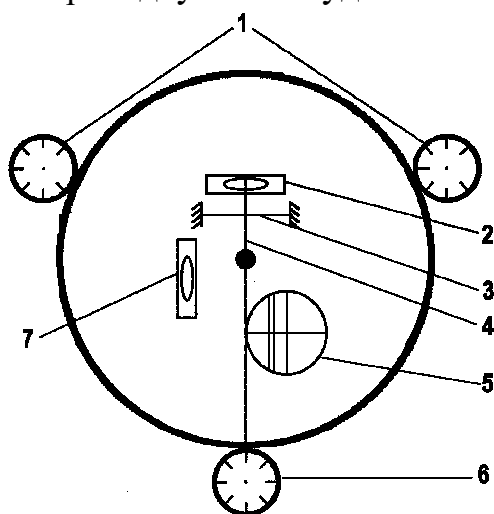


Рис. 2.1. Схема відносного положення окремих конструктивних елементів гравіметра. 1 – настановних гвинти поперечного нахилу, 2 – поперечний рівень, 3 – вісь обертання системи, 4 – важіль, 5 – окулярна шкала, 6 – настановний гвинт подовжнього нахилу, 7 – подовжнього рівень.

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

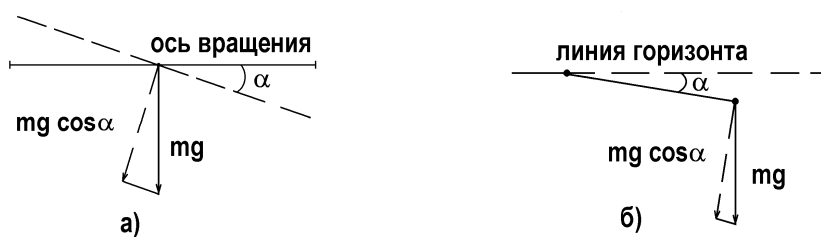


Рис. 2.2.

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

важеля.

У початковому етапі вивчення методики перевірки установки рівнів студентам пропонується виконати її в такий спосіб.

Гравіметр встановлюється 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 подовжнього 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. На кожному нахилі індекс системи суміщається з центральним штрихом шкали і на вимірювальному пристрої фіксуються відліки n_{-2} , і n_{-4} . По осі абсцис відклада-

ються значення кута нахилу α (у розподілах рівня), а по осі ординат – відліки по мікрометру. Якщо по відлікам 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 негативна, 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 юстировки рівня його пухирчик варто привести в нульове положення виправними гвинтами рівня. Після корекції нульового положення рівня вищеписаним чином виконується перевірка й у разі потреби регулювання уточнюють. Відзначимо, що 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 настановним гвинтом виводиться у вихідне положення і для обліку можливого зсуву нуля-пункту береться відлік n_0'' . Варто пам'ятати, що при іспиті подовжнього рівня поперечний повинний постійно знаходитися в нульовому положенні. Виконана серія вимірів дозволяє побудувати графіки залежності відліків від нахилу.

Зазначеним шляхом проводиться іспит і поперечного рівня. При цьому нахил здійснюється одночасним обертанням обох настановних гвинтів у протилежних напрямках на туж саму величину. Так що одним гвинтом корпус гравіметра піднімається, а іншим опускається. Контролем правильності погодженого нахилу за допомогою обох гвинтів є те, що пухирчик подовжнього 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 α . 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 придбання 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 устанавлюється на міцній підставі, нівелюється і за допомогою відлікового пристрою рухливий індекс системи ретельно суміщається з центральним нерухомим індексом окулярної шкали.

2. При подовжньому 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 ваги. Якщо гравіметр стосовно оператора встановлений так, як показано на рис. 2.1, то при нахилі системи індекс зміщається вправо. При нахилі в іншу сторону індекс системи також повинний піти у бік зменшення сили ваги на таку ж величину. Відзначимо, що при значному нахилі рухливий індекс системи завжди піде у бік зменшення

сили ваги. Тому бажано, щоб нахил був мінімальний, але достатній для упевненого фіксування зсуву індексу.

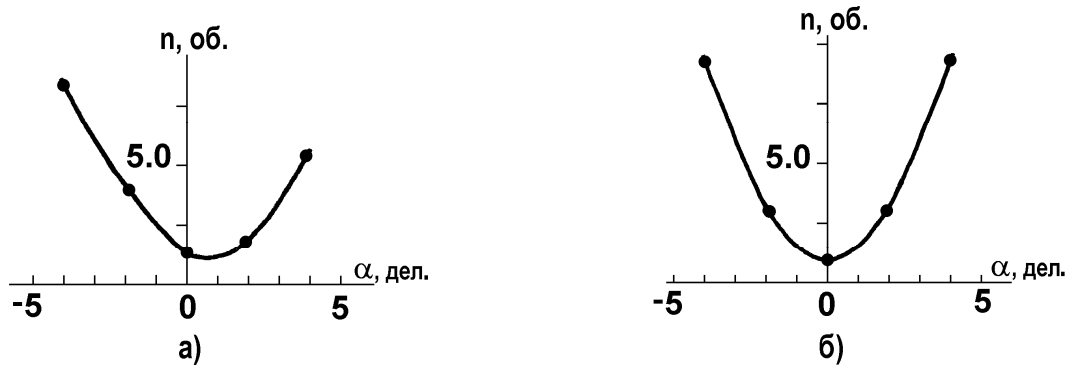


Рис. 2.3. Приклад залежності відліків гравіметра від кута його нахилу уздовж рівнів: а) подовжнього, б) поперечного

3. Якщо при нахилі в одну зі сторін індекс іде убік збільшення сили ваги, то рівень установлений 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 убік зменшення сили ваги, то знайдене правильне положення рівня. Якщо знову при деякому нахилі індекс зміщується убік збільшення сили ваги, то при цьому положенні піднімальних гвинтів рухливий індекс виводиться на середину шкали і знову повторюється нахил в одну й іншу сторону. Послідовними кроками необхідно знайти таке положення настановного гвинта, при якому підйом його на мінімальну величину нагору і вниз приводить до зсуву індексу в одну і ту ті сторону зменшення сили ваги. У цьому положенні настановного гвинта пухирець рівня виправними гвинтами виводиться на середину.

Аналогічно перевіряється і поперечний рівень. Тільки нахил здійснюється двома піднімальними гвинтами. Необхідно при цьому стежити за тим, щоб не сховався пухирець подовжнього рівня. Звичайно приходиться уточнювати установку рівнів послідовними наближеннями.

Відзначимо, що описаний метод перевірки правильності установки рівнів є самим точним і його можливості визначаються тільки чутливістю гравіметра і 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 настановним 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 позитивній ціні розподілу) і приблизно однакові по величині, то рівень установлений 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 установлений неправильно і необхідна його юстировка, як зазначено вище.

2.1.3. Визначення і регулювання чутливості гравіметра

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

$$\frac{\Delta x}{\Delta g} \cong kT^2 \quad (2.2)$$

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 та обставина, 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]. Гравіметр установлено 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 узяттям відліку n_0' . По відлікам 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

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

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 ваги. 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 рі-

вні 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 ваги. 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).

Звичайно, можливості описаного методу зміни чутливості обмежені. Наприклад, малу чутливість системи можна змінювати на десятки відсотків.

2.1.4. Визначення часу становлення відліку

Через вплив електростатичних зарядів на системі й інших причин рухливий індекс устанавлюється відповідно до величини сили ваги 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, можна створити її за допомогою віброплатформи. Але можна створити й іншим способом. Наприклад, якщо зйомка виконується пішохідна з витратами приблизно 5 хвилин на перехід між пунктами спостереження, то для створення вібрації гравіметр переноситься також 5 хвилин у звичайному темпі руху. Після цей гравіметр швидко встановлюється на міцній підставі (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 устанавленому відліку. Нижче проводимо ще одну лінію, що відстоїть від першої на величину середньоквадратичної погрішності ε_{in} одиничного виміру. Нагадаємо, що для ГНУ-КС у

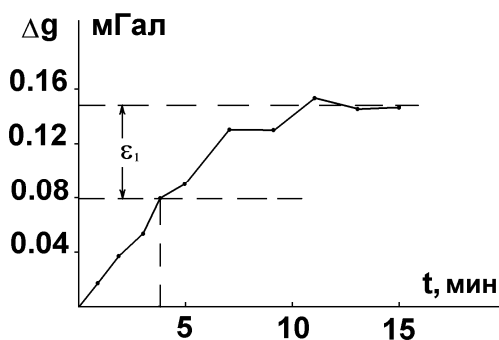


Рис. 2.4. Визначення часу становлення відліків гравіметра

кращому випадку вона складає 0.07 мГал, а для ГНУ-КВ – 0.03 мГал і вказується в паспорті приладу [2]. З точки перетину нижньої кривої з графіком опускаємо перпендикуляр на горизонтальну вісь і тим самим відтинаємо на ній час t_{cm} становлення відліків. Для вітчизняних 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.

2.1.5. Визначення температурної характеристики гравіметра

Вплив температури на показання гравіметра вивчається під час виготовлення системи чи її ремонту. Якщо під час виготовлення системи температурна компенсація ретельно відрегульована, то в гравіметрах типу ГНУ-КС і ГНУ-КВ слабо виявляється залежність відліків від температури. Спеціальної поправки за вплив температури у виміри з гравіметрами звичайно не вводиться. Тому залежності вимірів від температури в польових умовах і не вивчаються. Необхідно лише під час роботи стежити, щоб прилад не перегрівався (не піддавався тепловому удару) і температура усередині нього змінювалася плавно. Але в багатьох гравіметрах, зокрема, ГНУ-КВ існує визначена залежність ціни розподілу від температури приладу і цю залежність варто вивчати. До цього питання ще повернемося у третім розділі.

При необхідності залежність відліків від температури вивчають шляхом попереднього охолодження гравіметра в холодильнику з наступним узяттям серії відліків з фіксуванням поточної температури усередині приладу.

2.1.6. Визначення погрішності виміру з гравіметром

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

При виконанні лабораторної роботи, студентам пропонується провести найпростішу серію вимірів для виявлення характеру зміни нуля-пункту й оцінки погрішності одиничного виміру. 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 менш 2 годин. Отримані

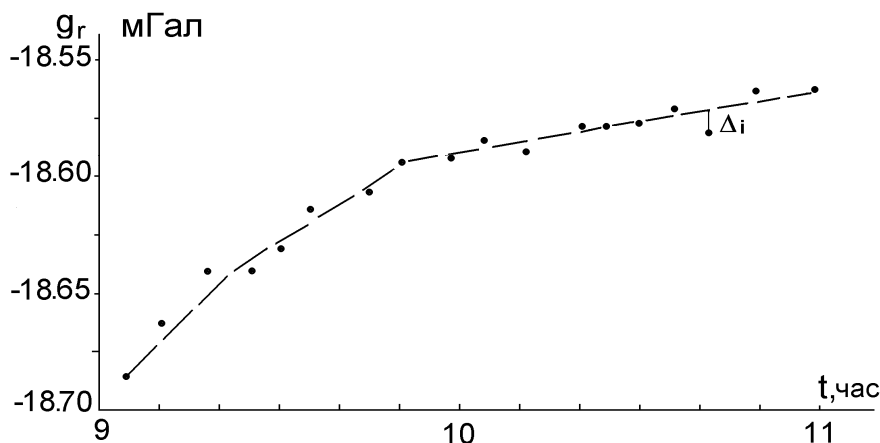


Рис. 2.5. Графік зсуву нуля-пункту гравіметра в рейсі

середні відліки по гравіметру множенням на ціну поділки переводяться потім у мілігали (докладніше див. п. 2.1.7). За результатами вимірів на одній точці будується у крупному масштабі залежність відліків від часу виміру (рис. 2.5). 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. 2.5 приведений згладжений відрізками прямих по 60 хвилин графік зміщення нуля-пункту гравіметра. Відхилення вихідних точок від згладженого графіка характеризують величину погрішності вимірів при відповідній тривалості ланки рейсу. Для оцінки погрішності виміру знаходяться відхилення Δ вихідних значень від кожного згладженого графіка. По них обчислюється середньоквадратична погрішність одиничного виміру при різній тривалості ланки рейсу

$$\varepsilon_{np} = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n-1}}, \quad (2.4)$$

де n – число вимірів. Варто мати на увазі, що тут n невелике – 10–15, і в цих умовах знайдене значення ε_{np} тільки наближено характеризує погрішність одиничного виміру гравіметра.

2.1.7. 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 необхідно тримати 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 ваги на кілька десятків мілігал, то відліковий пристрій встановлюється на малі відліки на лічильнику оборотів (при негативній 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 міцною основою. В окремих випадках, коли важко вибрати площадку, наприклад, на поораному полі, спочатку встановлюється невисока металева тринога. На неї потім встановлюється гравіметр. Важко виконати виміри з гравіметром на хитливому ґрунті, наприклад, на болоті. В окремих випадках тут приходиться забивати в ґрунт коли, щоб установити 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. Наприклад, відомо, що рівень мікросейсмів на Кримському півострові в окремі

періоди (пізньою осінню) настільки високий, що неможливо провести точні виміри.

При вимірі на пункті спостереження прилад нівелюється за допомогою піднімальних гвинтів по рівнях. Нагадаємо, що піднімальні гвинти гравіметра розташовані так, що двома піднімальними гвинтами легко встановлюється положення пухирця поперечного рівня, тобто паралельно осі обертання системи, а одним піднімальним гвинтом – подовжнього паралельного важеля (рис. 2.1). Так що при деякій навичці гравіметр нівелюється дуже швидко – менше хвилини.

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 оборотів мікрометра. У різних типах гравіметрів цього класу відліковий пристрій може розрізнятися. Але завжди мається лічильник цілих оборотів, на лімбі фіксуються соті частки обороту, а за допомогою ноніуса відлік уточнюється до тисячних часток, наприклад, 6.236 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 по годинній стрілці 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 по годинній стрілці, 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 (табл. 2.1). З цих відліків знаходиться середнє. Після цього прилад знімається і переноситься або перевозиться на наступний пункт. При цьому повинна бути забезпечена схоронність приладу. Під час перевезення прилад знаходиться на руках оператора або в спеціальному амортизаторі.

Таблиця 2.1. Приклад польового гравіметричного журналу

Гравіметр ГНУ-КС № 345.

Дата 24.06.89 р.

Оператор Сердюк В.Н.

№№ зп	Час, гг:мм	Темпер. приладу, °С	Відліки, об.			Середній відлік, об.	Примітка
			1-й	2-й	3-й		
ОПП-2	14:15	19.2	6.328	6.326	6.336	6.830	

2.2. Хід виконання роботи

У лабораторній роботі студент виконує перевірку і при необхідності регулювання приладу:

- перевірка і регулювання оптичної системи,
- перевірка і регулювання рівнів на мінімум чутливості відліків до нахилу,

- визначення часу становлення відліку,
- визначення і регулювання чутливості системи гравіметра,
- оцінка погрішності одиничного виміру³.

При виконанні роботи рекомендується виконати короткий рейс із гравіметром по одній зі схем з повторенням, наприклад, за схемою 1-2-3-1. У результаті студент повинний навчитися виконувати основні перевірки гравіметра і проводити з ним виміри.

2.3. Звіт про роботу

У зошиті для лабораторних робіт приводиться короткий опис перевірок приладу. Ці описи супроводжуються вимірюваними графіками, наприклад, залежності відліків від нахилу, залежності становлення відліків від часу й іншими.

2.4. Контрольні питання

1. Гравіметр нахилений шляхом обертання настановного гвинта. У яку сторону переміститься індекс системи на окулярній шкалі мікроскопа?
2. Через які причини відлік за гравіметром стабілізується не відразу, а протягом деякого часу?
3. Як настроїти гравіметр на необхідну чутливість до зміни сили ваги?
4. Як порівняти середньоквадратичну погрішність одиничного виміру двох гравіметрів?
5. Порядок роботи з гравіметром на точці.

3. ВИЗНАЧЕННЯ ЦІНИ ПОДІЛКИ ГРАВИМЕТРА

Мета роботи. Вивчити методи визначення ціни поділки гравіметрів.

3.1. Зміст роботи

Гравіметри зроблені за принципом пружинних ваг і вимірюють тільки приріст сили ваги. Приріст між точками характеризуються різницею відліків на вимірювальному пристрої гравіметра $\Delta g = g_2 - g_1 \approx n_2 - n_1$. Вимір приросту сили ваги з гравіметром виконується не в системі СГС чи СИ, а в відліках шкали мікрометричного пристрою. Щоб приріст сили ваги вимірювати в мілігалах, гравіметр необхідно еталонувати, тобто визначити ціну поділки C його відлікового пристрою. Якщо ціна поділки C визначена, то приріст сили ваги Δg між точками можна знайти $\Delta g = C(n_2 - n_1)$. Розмірність ціни поділки C мілігал поділений на оберт мікрометричного гвинта (мГал/об.). Наприклад, ціна поділки гравіметра розвідницького типу може бути $C = -6.810$ мГал/об. Ціна поділки кварцових гравіметрів часто негативна через розташування вимірювальної пружини. Будемо думати, що ціна поділки C постійна у вузькому діапазоні вимірів і температури приладу. Визначення нелінійності ціни поділки описується

³ Безпосередньо на лабораторній роботі студентом виконується не всі перевірки. Весь об'єм перевірок буде виконаний у період навчальної практики.

в спеціальних посібниках [2, 3, 8, 10]. У високоточних гравіметрів класу **B** відносна помилка визначення C повинна бути порядку $1 \cdot 10^{-4}$. Цим гравіметром можна вимірити приріст 100 мГал з абсолютною погрішністю 0.01 мГал. Гравіметри класу **C**, погрішність одиничного виміру яких до 0.07 мГал, можна еталонувати з відносною погрішністю $1 \cdot 10^{-3}$. У цьому випадку приріст величиною 50 мГал виміряється з абсолютною погрішністю ($50 \cdot 10^{-3} = 0.05$) мГал. Таким чином, при еталонуванні гравіметрів варто забезпечити необхідну відносну погрішність визначення ціни розподілу. Для кварцових гравіметрів використовується два методи визначення ціни розподілу – на профілі для еталонування з відомими приростами сили ваги на точках і методом нахилу.

3.1.1. Визначення ціни поділки на профілі для еталонування

Метод є основним у гравіметрії і найбільш точним. Для нього необхідний профіль для еталонування з декількома пунктами, між якими визначені значення Δg з високою точністю. Еталоніровочні профілі розташовуються звичайно в субмеридіональному напрямку, щоб одержати великі прирости Δg на невеликій відстані між пунктами. У нас у країні поки немає єдиної державної системи профілів і кожна гравіметрична організація має свій профіль, як правило, з відомими приростами. ДГП «Дніпрогеофізика» (м. Дніпро) має еталоніровочний профіль поблизу м. Новомосковська на Сімферопольському шосе. Під час практики тут визначається ціна поділки гравіметрів. Профіль включає чотири точки. Приріст Δg між точками профілю зменшується з півночі на південь і складає: $\Delta g_{21} = -11.93$, $\Delta g_{32} = -7.66$, $\Delta g_{43} = -27.60$ мГал. Це дозволяє еталонувати гравіметр тільки у вузькому діапазоні. Звичайно краще, якщо еталоніровочний профіль протягався, наприклад, від Архангельська до Ялти, щоб можна було еталонувати будь-які гравіметри, у тому числі і широкодіапазонні гравіметри ГНК.

Перед початком еталонування гравіметра виконуються всі необхідні регулювання і настроювання, як описано в розділі 2. Звичайно приходиться перебудувати і діапазон гравіметра, щоб вимірити приріст між першою й останньою точками профілю. Наприклад, на профілі приріст зменшується на 50 мГал, а ціна поділки гравіметра складає -6.810 мГал/об., тобто відліки по гравіметру зростають при зменшенні сили ваги. Якщо виміри починаються з північної точки 1, то для підготовки гравіметра до роботи треба лічильник оборотів мікрометричного гвинта установити, скажемо, на 2. У цьому положенні мікрометричного гвинта індекс може не бути в поле зору. Тоді гвинт діапазонного пристрою повертати доти, поки рухливий індекс не з'явиться в полі зору. Перебудувати діапазон гравіметра треба заздалегідь, а не під час рейсу. Після перебудови діапазону гравіметр може якийсь час знаходитися в неробочому режимі і необхідно його ввести в робочий режим.

Виміри з гравіметром на еталоніровочному профілі проводяться по одній зі схем з повторенням для того, щоб врахувати зсув нуля-пункту. Це може бути циклова схема чи схема подвійного кільця. Наприклад, нехай задані прирости Δg між точками 1-2-3-4. Виміри можуть виконуватися за схемою подвійного кі-

льця і рейс будується в такий спосіб 1-2-3-4-1-3-3-4-1. Рейс може бути виконаний і за цикловою методикою, наприклад, за схемою 1-2-1-2-3-2-3-4-3-4-1. Під час рейсу забезпечується швидке переміщення на профілі, а виміри проводить досвідчений оператор. Якщо при звичайній техніці виміру з приладами береться 3 відліки, то при еталонуванні на одному пункті збільшується кількість відліків до 5 – 6. Необхідно стежити за тим, щоб еталоніровочний рейс був виконаний у єдиному ритмі без помітних зупинок. До першого виміру на першому пункті рейсу гравіметр не менш півгодини повинний знаходитися в звичайних умовах транспортування. Гравіметричний еталоніровочний рейс обробляється в спеціальній відомості. Приклад такої обробки приведений у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Відомість обробки гравіметричного еталоніровочного рейсу
Гравіметр ГНУ-КС № 1243. Дата 25.06.89 р. Оператор Кравченко В.

№№ ПП	Час вимір.	Темп прибо- ру, °С	Серед- ній вимір, об.	Поправ- ка за нуль- пункт, об.	Виправ. відлік, об.	Серед. відлік, об.	Δп, об.	Δg _{етал.} , мГал	С, мГал/об.	С _{ср.} , мГал/об	ΔС , мГал/об.	ΔС _{ср.} , мГал/об
ЭГП- 1	8 ⁴⁵	22.0	4.666	0.000	4.666	4.693	4.421	-25.20	-5.700		0.021	
	10 ⁰⁴	22.0	4.635	0.060	4.695							
	11 ²⁸	22.0	4.598	0.120	4.718							
ЭГП- 2	9 ²⁸	22.0	9.081	0.029	9.110	9.114	2.570	-14.77	-5.747	-5.721	0.026	0.017
	10 ³⁰	22.0	9.048	0.070	9.118							
ЭГП- 3	9 ³⁸	22.0	11.642	0.041	11.683	11.684	-6.991	-39.97	-5.717		0.004	
	10 ⁵⁰	22.0	11.595	0.090	11.685							
ЭГП- 1						4.693						

Відзначимо, що приведений тут приклад заснований на вимірах, виконаних оператором невисокої кваліфікації. Тому помітний розкид обчислених значень ціни поділки *C* гравіметра.

3.1.2. Визначення ціни поділки методом нахилу

Суть методу в наступному. При нахилі гравіметра змінюється діюча на важіль величина сили ваги. Наприклад, при горизонтальному положенні осі обертання на важіль діє сила ваги *g*, як показано на рис. 2.2, а. При нахилі осі обертання на кут α (важіль може переміщатися тільки в площині, перпендикулярній осі обертання). В цій площині сила, що його переміщає, буде вже менше. Вона складає $g \cos \alpha$. Так що при нахилі осі обертання гравіметра відбувається уявне зменшення сили ваги на величину

$$\Delta g = g \cos \alpha - g = -g(1 - \cos \alpha) = -2g \sin^2 \frac{\alpha}{2}.$$

При малих кутах α нахилу вираження заміняється наближенням

$$\Delta g = -g \frac{\alpha^2}{2}. \quad (3.1)$$

Така ж існує залежність діючої сили ваги від подовжнього нахилу, тобто коли нахиляється площина, до якої приводиться при вимірі важіль гравіметра. Відзначимо, що з погляду теоретичного обґрунтування подовжній нахил переважніше. Але ускладнення викликане тим, що при подовжньому нахилі вантажем нагору зростає чутливість системи і при кутах більших 11' вимір провести не можна. Тому звичайно ціна розподілу гравіметра визначається поперечним нахилом.

На підставі викладеного, ідея виміру ціни поділки полягає в наступному. При горизонтальному положенні системи береться відлік по гравіметричній системі. Нахиляється гравіметр на кут α . Кут нахилу α при цьому повинний бути вимірюваний. У цьому положенні гравіметра також береться відлік n_α . Значення ціни поділки знаходиться як відношення удаваного зменшення сили ваги Δg і різниці відліків

$$C = \frac{\Delta g}{n_\alpha - n_0}. \quad (3.2)$$

Метод простий по ідеї і при наявності необхідного устаткування вимагає небагато часу. Проте, метод по різних причинах є все-таки допоміжним. Це зв'язано головним чином із труднощами точного виміру кута нахилу гравіметра.

У методиці визначення ціни поділки нахилом частіше кут α вимірюється тангенціальним способом за допомогою екзаменатора. Екзаменатор – спеціальна подовжена металева плита, у яку вмонтовані три настановних гвинти – два зближених **1** і один віддалений **2** (рис. 3.1). Паралельно лінії, що з'єднує два зближених гвинти, умонтований рівень. За допомогою його поперечну лінію екзаменатора можна установити горизонтально. Відстань від відокремленого гвинта до лінії, що з'єднує два зближених гвинти, називається базою екзаменатора **l** і вона дорівнює 700 мм або 2000 мм. Піднімальний гвинт має крок **d**, рівний 1 мм. Так що якщо зроблене **n** оборотів піднімального гвинта, то висота підйому **nd** і тангенс кута нахилу α дорівнює

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{nd}{l}. \quad (3.3)$$

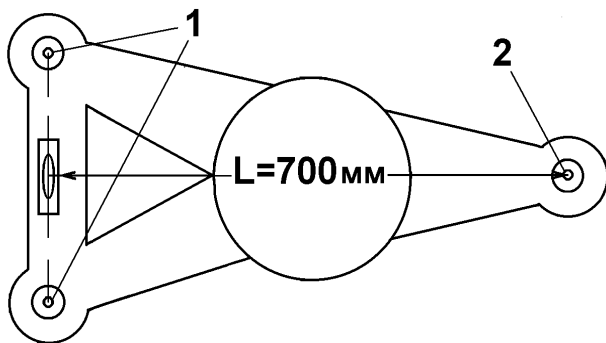


Рис. 3.1. Зовнішній вид екзаменатора з базою 700 мм

При малих кутах нахилу можна вважати, що $\alpha \approx \frac{nd}{l}$. Цей спосіб виміру кута називається тангенціальним. При зазначених розмірах один оборот гвинта приводить до кута $1/700$. В екзаменаторах зі збільшеної до 2 м базою підземний гвинт забезпечений мікрометричним пристроєм. Це дозволяє підвищити точність визначення кута α .

Визначення ціни поділки гравіметра за допомогою екзаменатора робиться в такий спосіб. Насамперед, пере-

будується діапазон гравіметра. Якщо в гравіметрі відліки збільшуються при зменшенні сили ваги, тобто ціна розподілу негативна, то діапазонною пружиною гравіметр перебудується на мінімальний відлік на лічильнику оборотів. Екзаменатор установлюється на міцну підставу і його поперечну вісь нівелюється. На око нівелюється і подовжній нахил. Сам гравіметр розміщується на круглій площадці екзаменатора (рис. 3.1). Визначення ціни поділки звичайно проводиться поперечним нахилом і тому лінія поперечного рівня гравіметра встановлюється паралельно базі екзаменатора. Гравіметр на площадці нівелюється власними настановними гвинтами. Перевіряється правильність установки гравіметра – при обертанні подовжнього гвинта екзаменатора повинний зміщатися пухирець тільки поперечного рівня гравіметра. Якщо зміщується також пухирець подовжнього, то положення гравіметра уточнюється обертанням його біля вертикальної осі в потрібну сторону. Після правильної установки гравіметра на екзаменаторі проводиться вимір ціни розподілу.

У згоді з викладеною ідеєю вивчається залежність відліків n гравіметра від кута нахилу α екзаменатора. При нульовому положенні екзаменатора береться відлік n_0 по мікрометру гравіметра. Потім гравіметр нахиляється на подовжній базі екзаменатора шляхом обертання піднімального гвинта, наприклад, по годинній стрілці. На кожному повороті гвинта береться відповідний відлік: n_1, n_2, n_3, \dots . Піднімальний гвинт екзаменатора повертати доти, поки можна узяти відлік на гравіметрі. Потім піднімальним гвинтом екзаменатор повертається у вихідне положення і знову береться відлік n'_0 . Після цього екзаменатор нахиляється в іншу сторону. На кожному нахилі екзаменатора також береться відлік: $n_{-1}, n_{-2}, n_{-3}, \dots$. Екзаменатор повертається у вихідне положення і знову береться відлік n''_0 . Якщо ці три відліки n_0, n'_0 і n''_0 при нульовому положенні екзаменатора помітно розрізняються, то в наступному можна ввести поправку за зсув нуля-пункту гравіметра.

Відзначимо, що серію вимірів у залежності від нахилу можна виконати і по-іншому. Відразу задати екзаменатору максимальний нахил, скажемо, обертанням піднімального гвинта по годинній стрілці і узяти відлік по гравіметру. Потім через кожен оборот гвинта, а потім і через півоберта зменшувати нахил, вивести гравіметр у нульове положення і задати протилежний нахил. При кожному нахилі екзаменатора індекс гравіметра сполучається з довгим штрихом шкали і береться відлік.

Після введення поправки за нуль-пункт будується залежність відліків гравіметра від кутів нахилу екзаменатора (рис. 3.2). Хоча гравіметр попередньо регулюється на мінімум чутливості до нахилу, як це описано в розділі 2, може виявитися, що мінімальний відлік, як і на рис. 3.2, не відповідає нулю нахилу. Виявити це можна, якщо провести серію горизонтальних хорд параболи і знайти їхню середину. Таким способом на рис. 3.2 виявлено, що нуль горизонтальної шкали необхідно змістити. Нова шкала показана в нижній частині цього рисунка. Для кожного кута нахилу обчислюється приріст $\Delta g'$ по формулі (3.1) і відповідне значення приросту відліків $n_\alpha - n_0$. Значення g у точці виміру досить знати з точністю 50 мГал. Відзначимо, що якщо вершина параболи зміщена

щодо нуля, як на рис. 3.2, то при обчисленні кута нахилу обороти піднімального гвинта вже не будуть цілими числами. Так що, наприклад, нахил гравіметра на 4.3 обороту гвинта екзаменатора (права гілка параболи на рис. 3.2) приводить до уявної зміни діючої сили ваги Δg на величину

$$\Delta g^* = -980940 \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{4.3}{700}\right)^2 = -\frac{980940}{980000} \cdot (4.3)^2 = -1.0009591 \cdot (4.3)^2 = -18.508 \text{ мГал}$$

У такий же спосіб обчислюється приріст Δg^* для кожного кута нахилу правої і лівої гілок параболи. Обчислюється також відповідна їм при нахилі $\Delta n = n_\alpha - n_0$

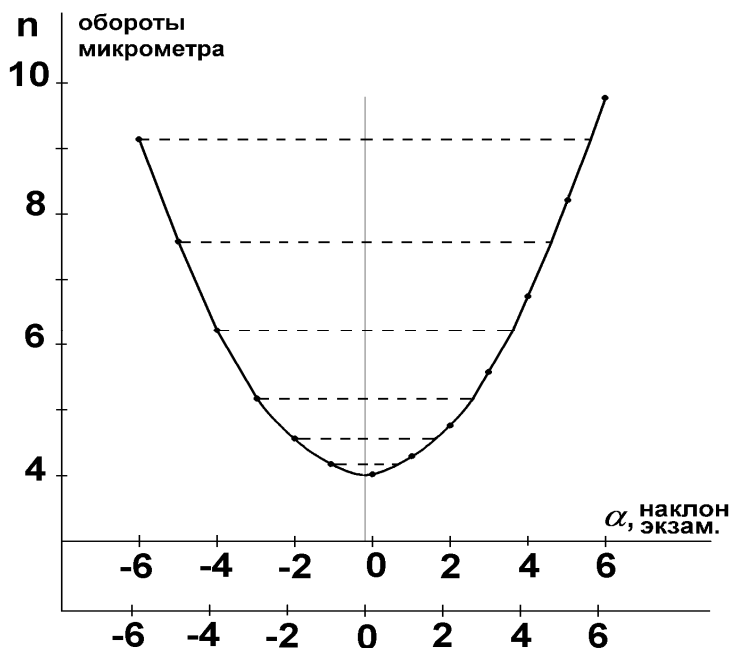


Рис. 3.2. Залежності відліків гравіметра від його нахилу

зміна відліку на мікрометричному пристрої гравіметра. За результатами обчислення складається таблиця значень Δg_i^* і Δn_i розраховується ціна

поділки гравіметра $C_i = \frac{\Delta g_i^*}{\Delta n_i}$ й

оцінюється точність її визначення. Відомо, що за допомогою екзаменатора ціна поділки гравіметра визначається не дуже точно з відносною помилкою не краще, ніж $1 \cdot 10^{-3}$. Визначення ціни поділки гравіметра методом нахилу з високою точністю можливо тільки при високоточних вимірах кута нахилу. Для цієї мети розроблена спеціальна установка УЭПП-1,

у якій кут α нахилу гравіметра визначається за допомогою вертикального вимірювального кола. Тому що тут можна вимірити кут з точністю до $0.1''$, то відносну помилку визначення ціни поділки гравіметра можна понизити до $1 \cdot 10^{-4}$. Методика визначення ціни поділки гравіметра за допомогою установки УЭПП-1 описана в літературі [2, 3].

Відзначимо, що в багатьох кварцових гравіметрів виявляється залежність ціни поділки C від температури приладу. Для визначення температурного коефіцієнта ціни поділки необхідно вимірити її принаймні при трьох-чотирьох температурах приладу, наприклад, 0°C , 5°C , 15°C і 25°C . Для охолодження приладу звичайно використовується холодильна камера, у яку на визначений час установлюється гравіметр. Зрозуміло, що ціна поділки повинна бути виміряна досить швидко, поки не змінилася температура приладу. Так що в цьому випадку ціну C поділки звичайно визначають у лабораторії методом нахилу за допомогою екзаменатора або установки УЭПП-1. Залежність ціни поділки від температури використовують при високоточних гравіметрових спостережен-

нях. Крім того, варто мати на увазі, що багато гравіметрів мають нелінійну шкалу. У цьому випадку ціна поділки не є постійною. Методи вивчення нелінійності шкали гравіметра можна знайти у відповідних посібниках з гравірозування [2, 3, 8, 10].

3.2. Хід виконання роботи

У лабораторії студент одержує завдання, для якого приладу визначити ціну поділки на екзаменаторі. Виміри виконуються, обробляються і зображуються відповідно до описаних вище методичних вказівок. Інший метод визначення ціни поділки по різниці сили ваги між точками еталоніровочної мережі вивчається тільки по літературі. Сам метод освоюється студентами під час навчальної практики в с. Орловщина на еталоніровочному профілі геофізичної експедиції.

3.3. Звіт про роботу

У звіті приводиться короткий опис обох методів визначення ціни поділки гравіметра. До опису метода нахилу додаються результати виміру й обчислення ціни поділки за прикладом наведеним вище.

3.4. Контрольні питання

1. Назвіть розмірність ціни поділки гравіметра.
2. Порівняйте достоїнства і недоліки двох методів визначення ціни поділки гравіметра.
3. Назвіть можливий третій спосіб визначення ціни поділки, що використовується в деяких закордонних гравіметрах, наприклад, GS.
4. Як можна вимірити кут нахилу гравіметра при визначенні його ціни поділки?
5. Як орієнтується гравіметр при еталонуванні методом нахилу?

4. ОБРОБКА ВИМІРІВ ІЗ ГРАВИМЕТРОМ

Мета роботи. Вивчити обробку гравіметричних вимірів на опорній і рядовий мережах.

4.1. Зміст роботи

Гравіметричні виміри обробляються, щоб знайти абсолютні значення сили ваги в кожному пункті мережі. Обробка гравіметричного рейсу взагалі нескладна і залежить від методики виміру на пунктах.

4.1.1. Обробка вимірів на пунктах опорної мережі

Виміри на опорній мережі виконуються по методиках з повтореннями. Для підвищення надійності і точності спостережень часто використовують методику «подвійного кільця», тобто за схемою 1-2-3-1-2-3-1. Результати вимірів заносять у польовий журнал. З польового журналу дані переносяться у відомість обробки (табл. 4.1), групуючи їх по найменуваннях пунктів вимірів.

Таблиця 4.1. Відомість обробки гравіметричних вимірів на опорній мережі
Гравіметр ГНУ-КС № 345. Ціна розподілу $C=-5.82$ мГал/про. Ділянка Придніпровська
25.06.15 р. Оператор Коваленко В.Н. Обчислювач Стебко К.В.

№№ ГП	Час вим. t , год-хв	Средн. відлік, n , об.	Відн. знач. g_r , мГал	Поправ- ка за нуль- пункт $P_{ин}$, мГал	Виправ. відн. знач. $g_{випр}$, мГал	Середнє відн. знач. $g_{ср}$, мГал	Приріст сили ваги Δg , мГал	Спост. знач. сили ваги $g_{спос}$, мГал
ОГП-1	9-00	5.382	-31.32	-0.00	-31.32			
ОГП-1	9-50	5.333	-31.04	-0.22	-31.26	-31.30		980944.18
ОГП-1	10-50	5.315	-30.93	-0.37	-31.30		-1.00	
ОГП-2	9-15	5.540	-32.24	-0.06	-32.30	-32.30		980943.18
ОГП-2	10-10	5.508	-32.06	-0.24	-32.30		1.09	
ОГП-3	9-30	5.342	-31.09	-0.11	-31.20	-31.21		980944.27
ОГП-3	10-25	5.313	-30.92	-0.30	-31.22		-0.09	
ОГП-1						-31.30		980944.18

Обробка спостережень виконується в наступному порядку:

- Обчислюється відносно значення сили ваги з точністю 0.01 мГал:

$$g_r = Cn.$$

- За результатами повторних вимірів на тих самих пунктах знаходиться поправка за зсув нуль-пункту гравіметра. При первісному вивченні методики обробки рекомендується знаходити поправки шляхом побудови графіка узагальненого нуль-пункту (рис. 4.1). Графік будується у великому масштабі: горизонтальний масштаб у 1 см 10 хв, а вертикальний у 1 см 0.1 мГал. При побудові графіка нуль-пункту звичайно приймається умовний рівень g_r для кожного з пунктів. Побудовані в такий спосіб графіки зсуву для кожної точки рейсу приведені на рис. 4.1. Графік на вихідному пункті складається з

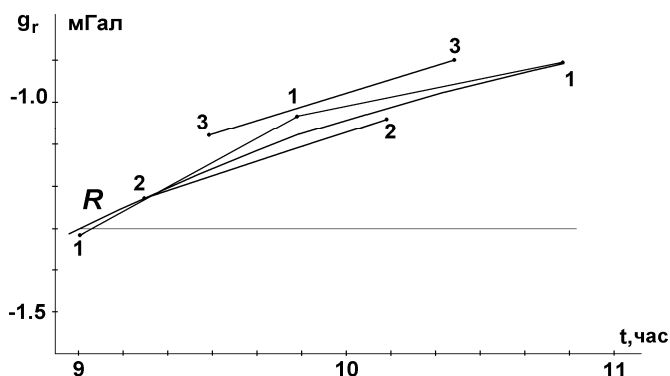


Рис. 4.1. Графіки зсуву нуль-пункту в опорному рейсі

двох відрізків і в такий спосіб можна виявити його нелінійність. Відрізки на інших пунктах переносяться паралельно на самий протяжний графік, і по них проводиться редуційна крива R , що і характеризує зсув нуль-пункту в рейсі. На рис. 4.1 відрізки графіка на окремих пунктах майже рівнобіжні. Тому графік нуль-пункту на ОГП-1 прийнятий за графік зсуву

нуль-пункту в рейсі.

- З точки на кривій R відповідної часу першого виміру на першій точці проводиться горизонтальна пряма, щодо якої визначається величина поправки

за зсув нуль-пункту $P_{ни}$. Величина зсуву нуль-пункту в першій точці завжди дорівнює нулю, а в інших пунктах рейсу – відхиленню кривої R від горизонтальної прямої. Наприклад, у 9^{15} величина зсуву нуль-пункту дорівнює 0.06 мГал. Поправка за нуль-пункт $P_{ни}$ завжди дорівнює зсуву зі зворотним знаком. Відзначимо, що в кварцових гравіметрів важіль системи з часом звичайно провисає і тому зсув нуль-пункту позитивний.

- Величина $P_{ни}$ додається до g_r і знаходиться виправлене за нуль-пункт значення $g_{випр}$.
- Для кожного пункту обчислюється середнє значення g_{cp} із виправлених $g_{випр}$.
- Далі знаходиться, як впливає з відомості, приріст сили ваги Δg між сусідніми пунктами. Так що для оброблюваного рейсу знаходяться значення $\Delta g_{21}=g_{cp.2}-g_{cp.1}$, $\Delta g_{32}=g_{cp.3}-g_{cp.2}$ і $\Delta g_{13}=g_{cp.1}-g_{cp.3}$.
- Обробка закінчується знаходженням спостереженого абсолютного значення $g_{снос}$ у всіх пунктах мережі. Для цього в одному з них повинно бути задане $g_{снос}$. Як видно з відомості, задано $g_{снос1}=980944.18$ мГал на ОГП-1. В всіх інших $g_{снос}$ знаходиться послідовним додаванням Δg . Звичайно, для перевірки наприкінці треба одержати знову $g_{снос1}=930944.29-0.11=980944.18$ мГал.

Подальша обробка гравіметричних вимірів з метою обчислення аномалій сили ваги виконується вже при складанні каталогу. Вона описана в розділі 6.

4.1.2. Обробка вимірів на пунктах рядової мережі

Виміри на рядовій мережі виконуються за рейсовою методикою. Рейс складається з ланок, що починаються і закінчуються на твердих пунктах (пунктах, де відомі значення сили ваги). Як приклад розглянемо виміри в дволанковому рейсі між трьома опорними пунктами ОГП-1, ОГП-2, ОГП-3. Виміри виконані за однократною методикою і для спрощення обробки прийнята тільки найпростіша прив'язка до опорних пунктів. З польового журналу результати виміру з гравіметром переносяться у відомість обробки (табл. 4.2): найменування гравіметричних пунктів, часи виміру і середні відліки. Подальша обробка виконується по ланках у такому порядку.

- Відліки n по гравіметру переводяться в мілігали, тобто $g_{ri}=Cn_i$. Обчислення проводяться з точністю до 0.01 мГал.
- Знаходяться вимірні прирости сили ваги в пунктах ланки рейсу щодо значення в першому його пункті, тобто $\Delta g_{вими} = g_{ri} - g_{rT1}$.
- Зсув нуль-пункту в пунктах ланки рейсу знаходять із припущення його лінійності. У цьому випадку досить обчислити величину зсуву нуль-пункту на останньому пункті ланки рейсу. Воно дорівнює різниці вимірюваного в ланці і точному значенні приросту сили ваги між його останнім і першим пунктом, тобто $f = \Delta g_{вимиT2} - (g_{абсT2} - g_{абсT1})$. За знайденому значенню f будується лінійний графік зсуву нуль-пункту (рис. 4.2). З графіка з протилежним знаком знімається з точністю 0.01 мГал поправка за нуль-пункт $P_{ниi}$ в кожному пункті ланки відповідно до часу виміру на ньому.

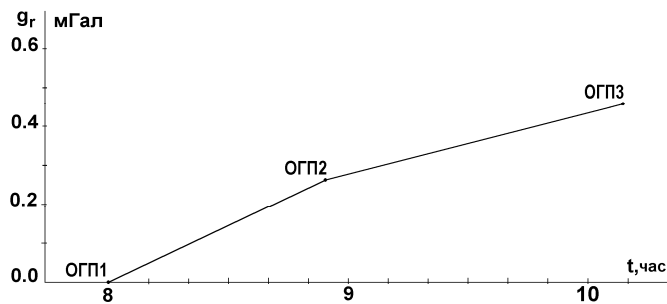


Рис. 4.2. Графіки зсуву нуля-пункту в рядовому рейсі

шляхом додатка виправленого приросту в них до відомого абсолютного значення в першій точці цієї ланки: $\Delta g_{спос i} = \Delta g_{абсТ1} + \Delta g_{випр i}$.

- Потім значення поправки за нуль-пункт складається з відповідним вимірним приростом і знаходиться виправлений за нуль-пункт приріст в кожному пункті ланки рейсу: $\Delta g_{випр i} = \Delta g_{вим i} + P_{ни i}$.

- Абсолютне спостережене значення сили ваги у всіх пунктах ланки рейсу обчислюється шляхом додатка виправленого приросту в них до відомого абсолютного значення в першій точці цієї ланки: $\Delta g_{спос i} = \Delta g_{абсТ1} + \Delta g_{випр i}$.

Таблиця 4.2. Відомість обробки гравіметричних вимірів на рядовій мережі
Гравіметр ГНУ-КС № 345. Ціна поділки $C = -5.82$ мГал/про. Ділянка Придніпровська
27.06.15 р. Оператор Коваленко В.Н. Обчислювач Стебко К.В.

№№ ГП	Час вимір. t, год-хв	Сред. відлік n, об.	Відн. знач. сили ваги, мГал	Приріст сили ваги $\Delta g_{вим}$, мГал	Поправка за нуль-пункт $P_{ни}$ мГал-	Виправ. приріст сили ваги $\Delta g_{випр}$, мГал	Абс. значення сили ваги $g_{спос}$, мГал
ОГП-1	8-00	5.846	-34.02	0.00	-0.00	0.00	980944.18
ГП1	8-07	5.805	-33.78	0.24	-0.07	0.14	944.32
ГП2	8-15	5.782	-33.65	0.37	-0.14	0.23	944.41
ГП3	8-23	5.764	-33.55	0.47	-0.21	0.26	944.44
ОГП-2	8-28	5.742	-33.42	0.60/0.00	-0.25/0.00	0.35/0.00	944.53
ГП4	8-35	5.672	-33.01	0.41	-0.04	0.37	944.90
ГП5	8-45	5.603	-32.61	0.81	-0.09	0.72	945.25
ГП6	8-52	5.524	-32.15	1.27	-0.13	1.14	945.67
ГП7	8-58	5.480	-31.89	1.53	-0.16	1.37	945.90
ОГП-3	9-05	5.417	-31.53	1.89	-0.20	1.69	946.22

Зуваження. У приведеному рейсі тверда точка ОГП-2 одночасно є останньою точкою першої ланки і першою точкою другої ланки, тому для цієї точки через дріб вписані по два значення $\Delta g_{вим}$, $P_{ни}$ і $\Delta g_{випр}$.

На цьому обробка рядового рейсу закінчується. Подальша обробка описується вже в розділі 6 при обчисленні аномальних значень сили ваги і складанні каталогу.

4.2. Хід виконання роботи

Студенту видається завдання у вигляді польових гравіметрових журналів спостережень на опорній і рядовій мережах. На лабораторних заняттях обробляються рейси відповідно до методичних вказівок, приведеним у даній роботі. Обчислення виконуються за допомогою мікрокалькулятора. Обробка закінчується знаходженням $g_{спос}$ для кожного пункту мереж.

4.3. Звіт про роботу

У зошиті для лабораторних робіт коротко описується порядок виконання роботи і необхідні формули. До цього опису додається основний результат – заповнені відомості обробки гравіметричних рейсів і побудовані на міліметровій графіці зсуву нуль-пункту.

4.4. Контрольні питання

1. Поясніть поняття гравіметричний рейс і його ланка.
2. Чим визначається тривалість ланки гравіметричного рейсу?
3. З якою метою розвивається опорна гравіметрична мережа?
4. Як визначити величину зсуву нуль-пункту гравіметра в ланці рядового рейсу?
5. Що таке поправка за зсув нуль-пункту гравіметра?

5. ВИРІВНЮВАННЯ ГРАВИМЕТРИЧНИХ ВИМІРІВ

Мета роботи. Вивчити прості аналітичні методи вирівнювання опорних гравіметричних мереж.

5.1. Зміст роботи

Опорні мережі розвиваються на першому етапі гравіметричних зйомок. Вони створюють на площі зйомки систему гравіметричних пунктів із твердими значеннями сили ваги. Ця система пунктів дозволяє враховувати зміщення нуль-пункту, прив'язувати гравіметричні виміри до абсолютних значень сили ваги і вирішувати деякі інші гравіметричні задачі.

Опорна мережа створюється шляхом виміру приросту сили ваги Δg між пунктами. Звичайно між двома пунктами виміри виконуються не менш двох разів, і за значення приросту Δg на зв'язку приймається його середнє. Опорні гравіметричні мережі зображуються графічно з вказівкою для кожної сторони (зв'язку) значення Δg , а також його ваги p (рис. 5.1, а). Значення ваги відповідає вірогідності вимірів Δg . За вагу ланки часто приймається кількість n незалежних вимірів Δg , іноді \sqrt{n} чи інші величини, що характеризують вірогідність Δg . На рис. 5.1, а показана типова мережа зі значеннями Δg і p для кожної ланки, а також абсолютне значення g у вихідному (твердому) пункті I . Опорні мережі, що не мають твердих пунктів або мають один із твердим значенням g , називаються вільними. У вільній мережі, що не має твердих пунктів, в одному з вузлів приймається умовне значення g . Відмітимо, що якщо немає надійних даних про різну вірогідність Δg , то їх варто вважати рівноважними. Цим при вирівнюванні будуть допущені менші викривлення, чим при неправильно зазначеній вазі.

Значення Δg між пунктами мережі неминуче містять погрішності виміру. Це приводить до того, що якщо передавати тверді значення g з вихідного пункту I (рис. 5.1, а) на будь-який пункт мережі різними шляхами, то в тому самому пункті виходять різні значення g . Наприклад, значення g у пункті 3 можна

знайти: $g_3 = g_1 + \Delta g_{11} + \Delta g_{21} + \Delta g_{32}$ або $g_3 = g_1 + \Delta g_{51} + \Delta g_{45} + \Delta g_{34}$. У результаті одержимо різні значення g_3 . Якщо ланки опорної мережі утворюють замкнуті полігони, як на рис. 5.1, а, то алгебраїчна сума приростів Δg_i , виміряних на сторонах полігона не дорівнює нулю й утворює нев'язку полігона. Наприклад, для полігона I нев'язку W_I можна знайти як алгебраїчну суму приростів $W_I = \Delta g_{45} + \Delta g_{34} + \Delta g_{23} + \Delta g_{25}$. Не нульові значення нев'язки показують, що прирости Δg містять погрішності і тому гравіметрична мережа потребує вирівнювання з метою створення системи твердих пунктів на площі зйомки.

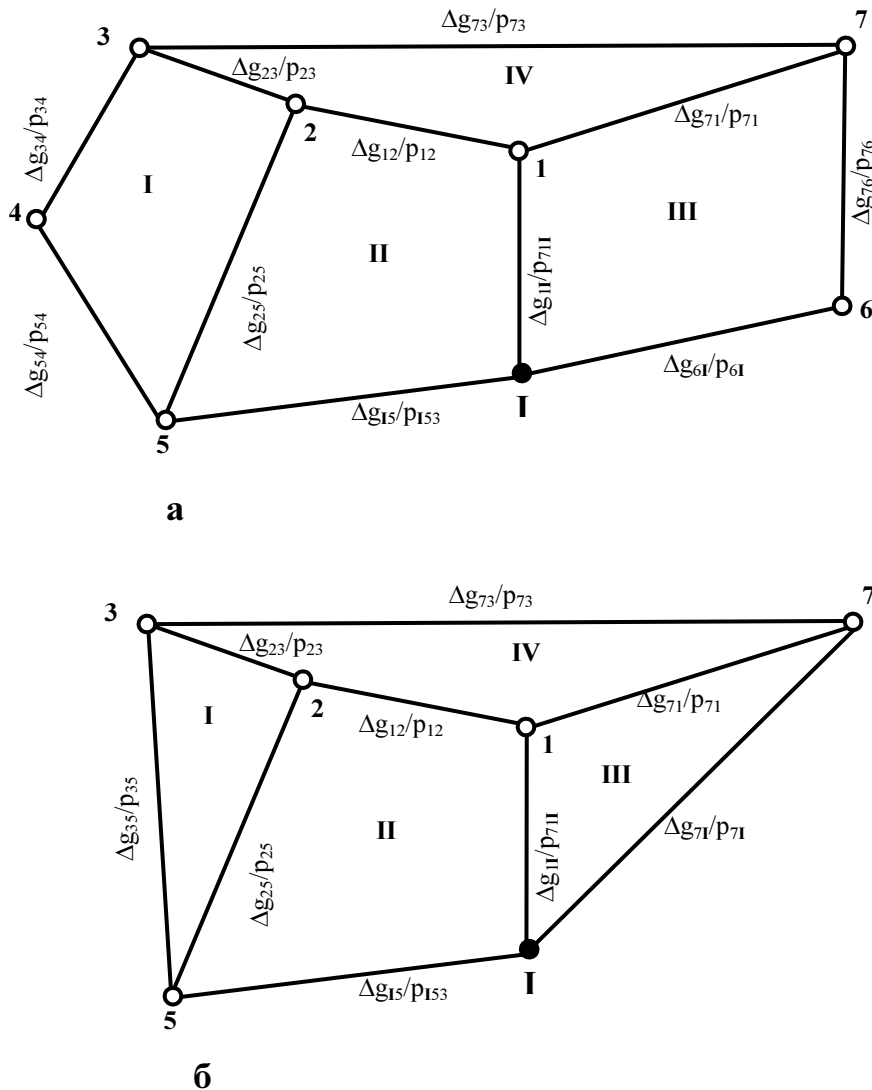


Рис. 5.1. Схеми вільних опорних гравіметричних мереж

Метою вирівнювання є знаходження таких поправок δ до вимірюваних значень Δg на ланках опорної мережі, що виправлені $\Delta g_{випрi} = \Delta g_i + \delta_i$ будуть задовольняти критерію – алгебраїчна сума $\Delta g_{випрi}$ на сторонах замкнутого полігона повинна дорівнювати нулю. У даній роботі приведемо наочне найпростіше формулювання алгоритму вирівнювання гравіметричних вимірів шляхом рішення системи лінійних рівнянь для двох методів – полігонів і вузлів.

Відомо, що вирівнювання складних мереж виконується звичайно методами послідовних наближень. У методах послідовних наближень полігонів і вузлів

лів запропонованих В.В. Поповим у вигляді зручних схем, реалізованих прямо на кресленні. Ці графічні методи описані в окремій методичній розробці. Тут ми основну увагу приділимо математичному формулюванню задач вирівнювання шляхом рішення систем лінійних рівнянь.

Відзначимо, що в опорній мережі можуть бути як вузлові пункти (1, 1, 2, 3, 5, 7 на рис. 5.1, а) так і проміжні, у яких сходяться тільки два зв'язки (4 і 6). Вирівнювання мережі спрощується, якщо в мережі всі пункти вузлові. Необхідне перетворення мережі зробити неважко, наприклад, шляхом заміни зв'язків 4–5 і 3–4 зв'язком 3–5. У цьому випадку $\Delta g_{35} = \Delta g_{45} + \Delta g_{34}$, а вага p_{35} цієї ланки можна знайти зі співвідношення $\frac{1}{p_{35}} = \frac{1}{p_{45}} + \frac{1}{p_{34}}$. Аналогічно зв'язки 6–1 і 7–6

заміняються зв'язком 7–1. Перетворення зручно виконати перед вирівнюванням і на рис. 5.1, б приведена вихідна мережа, у якій шляхом описаного перетворення залишені тільки вузлові пункти.

5.1.1. Вирівнювання опорної гравіметричної мережі методом полігонів

Методом полігонів вирівнюються опорні мережі, що утворюють замкнуті полігони з непересічними сторонами. Крім того, мережа має мінімальну кількість твердих пунктів, що можуть розташовуватися тільки на зовнішніх її сторонах.

Приклад мережі, яку можна вирівняти методом полігонів, приведений на рис. 5.1, б. Тут є тільки одна точка з твердим значенням g . У принципі в мережі може бути й інша тверда точка II, але вона повинна розташовуватися на зовнішній її стороні (рис. 5.2). При вирівнюванні методом полігонів у цьому випадку вводиться ще один полігон, який замкне між собою тверді точки I і II гравіметричної мережі (рис. 5.2). Звичайно, зв'язку I–II варто приписати саму більшу вагу.

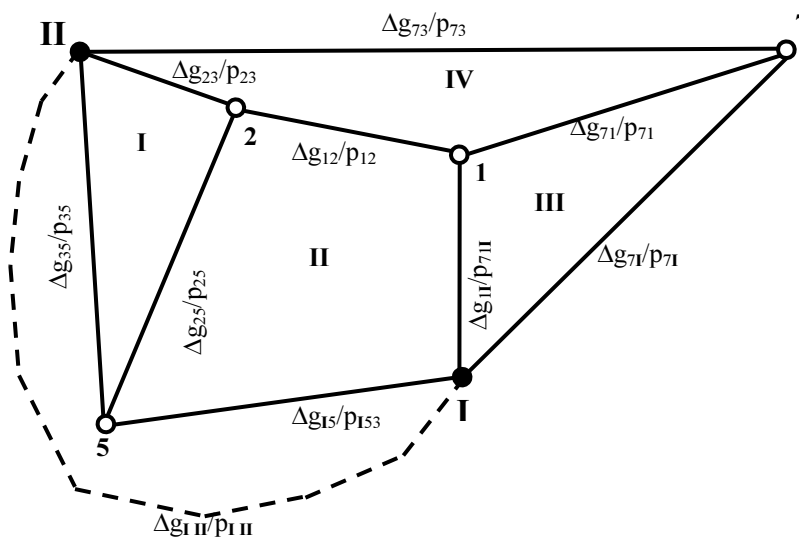


Рис. 5.2. Схема опорної гравіметричної мережі з двома твердими пунктами

Вирівнювання методом полігонів пояснимо на прикладі вільної найпростішої мережі, що складається з трьох полігонів (рис. 5.3). На зв'язках приведене вимірюване значення Δg (у мілігалах), а також p – вага ланки. Стрілкою показаний напрямок зростання сили ваги. У точці I задане тверде значення g . Вага зв'язку $I-1$ має значення 0.67 , тому що він отриманий об'єднанням двох послідовних зв'язків з $p = 2$ і $p = 1$. Відзначимо, що схему полігонів для вирівнювання на кресленні можна зображувати довільно без дотримання масштабу. Знайдемо спочатку нев'язку полігонів по всім трьом полігонам:

$$\begin{aligned} W_I &= 2.10 - 1.70 - 0.30 = 0.10 \text{ мГал}, \\ W_{II} &= 1.70 - 1.05 - 0.50 = 0.15 \text{ мГал}, \\ W_{III} &= 0.30 + 0.50 - 0.90 = 0.10 \text{ мГал}. \end{aligned}$$

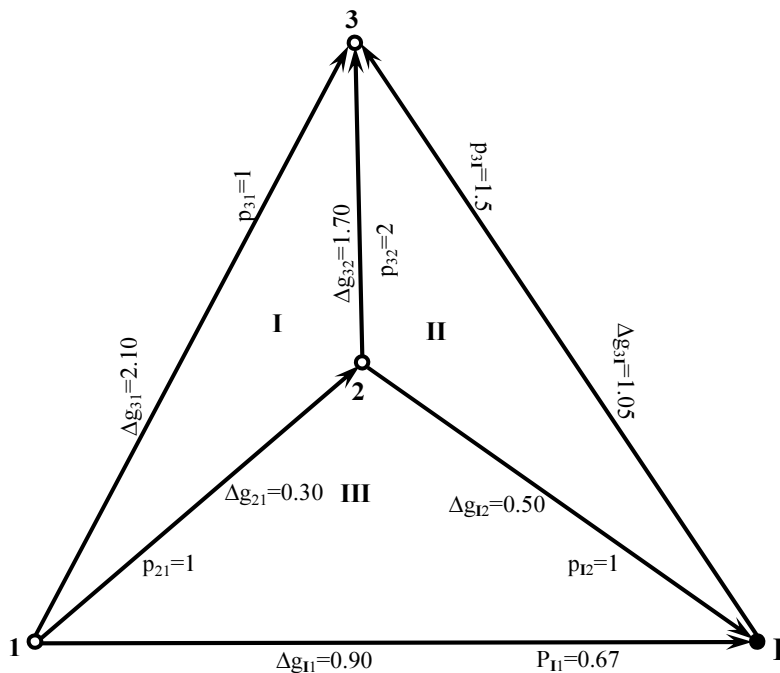


Рис. 5.3. Вихідна опорна мережа для вирівнювання методом полігонів

Наявність нев'язок у полігонах показує, що вимірювані значення Δg містять погрешності і тому ця гравіметрична мережа підлягає вирівнюванню. Ідея вирівнювання мережі методом полігонів проста. Пояснимо її шляхом наступних міркувань. Нехай полігон I з рис. 5.3 не має суміжних з іншими полігонами сторін і всі його сторони однаково "винні" в утворенні нев'язки, тобто мають однакову вагу. Тоді поправку на сторону полігона можна було б знайти

$$k_I = -\frac{v_I}{3}. \text{ Якщо сторони}$$

полігона мають різну вагу, то внесок сторони в утворення нев'язки буде тим більше, чим менше її вага. Так що поправка на сторону буде обернено-пропорційна її вазі. Так для полігона I (рис. 5.3) поправку оберненої ваги його сторін можна знайти

$$k_I = -\frac{v_I}{(1/p_{31} + 1/p_{32} + 1/p_{21})}. \quad (5.2)$$

$$k_I = -\frac{v_I}{(1/p_{31} + 1/p_{32} + 1/p_{21})}. \quad (5.2)$$

Відмітимо, що за аналогією з геодезичною термінологією [6] суму зворотних ваг часто називають "периметром" полігона

$$N_I = 1/p_{31} + 1/p_{32} + 1/p_{21}. \quad (5.3)$$

Звідси поправка за одиницю зворотної ваги можна записати

$$k_I = -\frac{\nu_I}{N_I} . \quad (5.4)$$

Поправку на сторону з вагою, наприклад, p_{31} тоді можна знайти

$$\delta_{31} = k_I \frac{l}{p_{31}} . \quad (5.5)$$

Таким чином, виконання основного критерію вирівнювання цим методом для окремого полігона приводить до рівняння

$$N_I \cdot k_I + \nu_I = 0 . \quad (5.6)$$

Зрівняльні обчислення ускладнюються, якщо є суміжні полігони, як на рис. 5.3. У цьому випадку для кожного полігона можна записати рівняння виду (5.6). Але такий підхід буде неправильний, тому що в виміряне значення Δg загальної сторони вводиться поправка, що повинна задовольняти також рівнянням суміжних полігонів. Так що рівняння (5.6) для першого полігона повинне бути розширене з врахуванням двох суміжних сторін

$$N_I k_I - \frac{l}{p_{32}} k_{II} - \frac{l}{p_{31}} k_{III} + \nu_I = 0 . \quad (5.7)$$

Для другого і третього полігонів за аналогією можна записати

$$N_{II} k_{II} - \frac{l}{p_{23}} k_I - \frac{l}{p_{21}} k_{III} + \nu_{II} = 0 ,$$

$$N_{III} k_{III} - \frac{l}{p_{12}} k_I - \frac{l}{p_{21}} k_{II} + \nu_{III} = 0 .$$

Щодо поправок k_n на сторони, так званих корелят, ці рівняння лінійні. Кількість рівнянь дорівнює числу полігонів. Складемо в числах систему трьох рівнянь для опорної мережі на рис. 5.3.

$$\begin{cases} 2.50k_I & -0.50k_{II} & -k_{III} = & -0.10, \\ -0.50k_I & +2.17k_{II} & -k_{III} = & -0.15, \\ -k_I & -k_{II} & +3.50k_{III} = & 0.10. \end{cases}$$

У результаті рішення системи рівнянь знаходяться поправки (кореляти) k_n на одиницю зворотної ваги сторони для кожного полігона. Поправки на зовнішній зв'язок мережі знаходиться вже в згоді з (5.5).

Для внутрішніх зв'язків мережі поправка дорівнює різниці відповідних поправок у суміжних полігонах. Наприклад, для зв'язку 3–2, що розділяє полігони I і II, поправка в полігоні I дорівнює

$$\delta_{32} = (k_I - k_{II}) \cdot \frac{l}{p_{32}} .$$

У полігоні II поправка на цей же зв'язок дорівнює

$$\delta_{23} = (k_{II} - k_I) \cdot \frac{l}{p_{23}} .$$

Зазначеним шляхом можна знайти поправки на всі зв'язки мережі. Контролем правильності знаходження поправок на зв'язках є наступне – сума поправок усередині полігона повинна дорівнювати вихідній нев'язці, узятій зі зворотним знаком. Так що для полігона I:

$$\sum_i \delta_{iI} + v_I = 0.$$

Аналогічно для другого і третього полігонів

$$\sum_i \delta_{iII} + v_{II} = 0,$$

$$\sum_i \delta_{iIII} + v_{III} = 0. \quad (5.9)$$

Виправлене значення $\Delta g_{\text{випр}}$ знаходиться шляхом алгебраїчного підсумовування знайдених поправок і відповідних їм вимірних значень Δg . Знак вимірюваного Δg на зв'язці позитивний, якщо обхід полігона по годинній стрілці збігається з напрямком зростання сили ваги на ній. Наприклад, у полігоні I вимірюваний приріст на зв'язці 1–3 дорівнює 2.10 мГал (стрілка збігається з напрямком по часовій). Поправка на цю сторону -0.06 мГал. Значить $\Delta g_{\text{випр}}$ дорівнює $+2.10 - 0.06 = +2.04$ мГал і укладено в прямокутну рамку на схемі. Для зв'язки 3–2 у полігоні I $\Delta g_{\text{випр}} = -1.70 + 0.01 = -1.69$ мГал. Воно записується без знака в прямокутній рамці. Знак указувати не потрібно, тому що він визначається напрямком стрілки на стороні полігона. Для цієї ж сторони в полігоні II зв'язка 2–3 $\Delta g_{\text{випр}} = +1.70 - 0.01 = +1.69$ мГал. Так що для кожної зв'язки, що розділяє полігони, указуються дві поправки (вони розрізняються знаками) і одне виправлене значення сили ваги.

5.1.2. Вирівнювання опорної гравіметричної мережі методом вузлів

Методом вузлів вирівнюються гравіметричні мережі, зв'язки яких можуть перетинатися, твердих точок може бути декілька, і вони можуть розташовуватися усередині мережі. Цим методом можна вирівнювати складні великі граві-

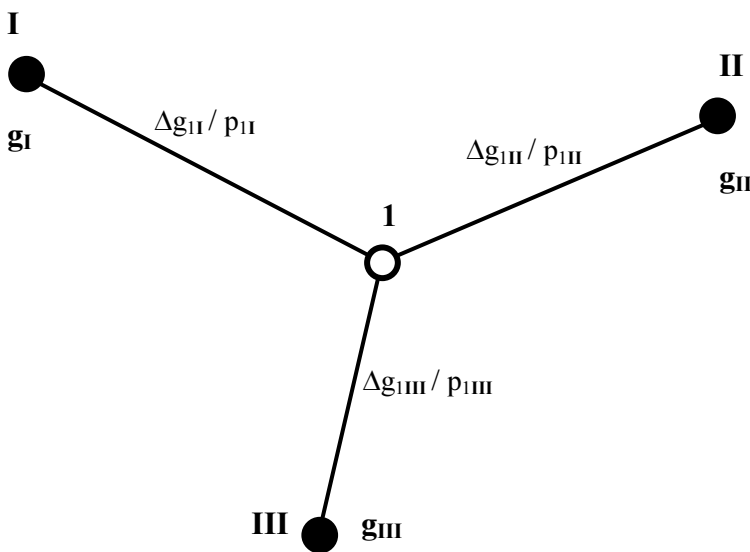


Рис. 5.4.

метричні мережі. У методі використовується проста ідея, яку краще пояснити на простому прикладі, де три пункти з твердими значеннями g_I, g_{II}, g_{III} і тільки один пункт 1, у якому необхідно визначити значення g_1 (рис. 5.4). Крім того, задані вимірювані прирости $\Delta g_{II}, \Delta g_{I1}, \Delta g_{III1}$ на зв'язках мережі, а також ваги зв'язків $\rho_{II}, \rho_{I1}, \rho_{III1}$. У цьому простому випадку вирівнювання

зводиться до наступної операції. З трьох твердих сусідніх точок шляхом додавання відповідних приростів у точку I передаються три різних абсолютних значення:

$$\begin{aligned}g'_I &= g_I + \Delta g_{II}, \\g''_I &= g_{II} + \Delta g_{III}, \\g'''_I &= g_{III} + \Delta g_{IIII}.\end{aligned}$$

Ймовірне абсолютне значення g_I у точці I дорівнює зваженому середньому зі значень g'_I, g''_I, g'''_I :

$$g_I = \frac{p_{II}g'_I + p_{IIII}g''_I + p_{IIII}g'''_I}{p_{II} + p_{IIII} + p_{IIII}}. \quad (5.10)$$

У розгорнутому вигляді значення g_I можна знайти

$$g_I = \frac{1}{p_{II} + p_{IIII} + p_{IIII}} [p_{II}(g_I + \Delta g_{II}) + p_{IIII}(g_{II} + \Delta g_{III}) + p_{IIII}(g_{III} + \Delta g_{IIII})] \quad (5.11)$$

У даному випадку знайдене середнє зважене значення g_I приймається в якості вирівняного. Якби всі прирости Δg були рівноважні, то значення g_I , вирівняне методом вузлів, можна знайти як середнє арифметичне значень, переданих із сусідніх вузлів

$$g_I = \frac{1}{3}(g'_I + g''_I + g'''_I)$$

Уведемо поняття ваги вузла

$$P_I = p_{II} + p_{IIII} + p_{IIII}, \quad (5.12)$$

як суму ваг зв'язків, що сходяться до цього вузла. Тоді рівняння для g_I згідно (5.11) можна записати

$$P_I g_I = p_{II}(g_I + \Delta g_{II}) + p_{IIII}(g_{II} + \Delta g_{III}) + p_{IIII}(g_{III} + \Delta g_{IIII}) \quad (5.13)$$

Величину в правій частині звичайно називають значенням вузла

$$G_I = p_{II}(g_I + \Delta g_{II}) + p_{IIII}(g_{II} + \Delta g_{III}) + p_{IIII}(g_{III} + \Delta g_{IIII}) \quad (5.14)$$

Тоді рівняння (5.14) можна переписати

$$P_I g_I = G_I. \quad (5.15)$$

Це типовий запис у методі вузлів. Тепер можна записати систему рівнянь для визначення абсолютного значення g у будь-якому пункті мережі.

Розглянемо тепер більш складну мережу, що складається з двох твердих пунктів з абсолютними значеннями g_I і g_{II} і чотирьох вузлів, де треба визначити відповідні значення g_1, g_2, g_3 і g_4 (рис. 5.5). На схемі для кожного зв'язку записані два числа – перше величина приросту Δg (напрямок його збільшення показано стрілкою), а друге – вага зв'язку. Приріст Δg містить погрішності, тому що значення g , отримані в нетвердих пунктах передачею з твердих пунктів, залежать від шляху передачі. Тому мережа підлягає вирівнюванню. Для визначення значень сили ваги g_1, g_2, g_3 і g_4 запишемо систему чотирьох рівнянь за аналогією з записом (5.13), але перенесемо вліво значення g_n у точках, що підлягають визначенню:

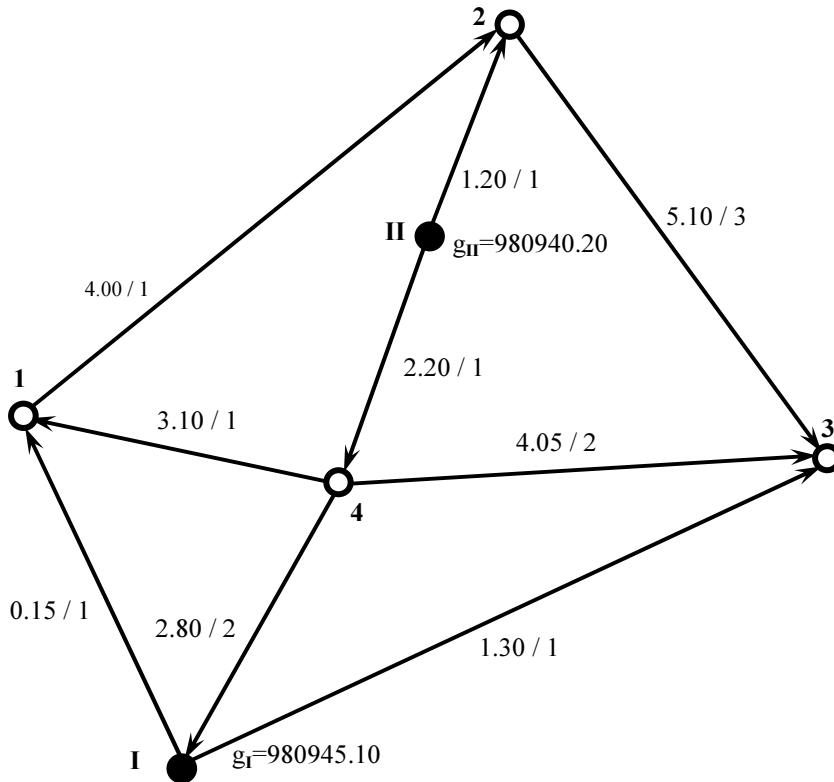


Рис. 5.5. Вихідна опорна мережа для вирівнювання методом вузлів

$$\begin{cases} P_1 g_1 - p_{41} g_4 - p_{21} g_2 = G_1, \\ P_2 g_2 - p_{12} g_1 - p_{32} g_3 = G_2, \\ P_3 g_3 - p_{43} g_4 - p_{23} g_2 = G_3, \\ P_4 g_4 - p_{41} g_1 - p_{34} g_3 = G_4. \end{cases} \quad (5.16)$$

Тут:

$$\begin{aligned} G_1 &= p_{21} \Delta g_{21} + p_{41} \Delta g_{41} + p_{11} (g_1 + \Delta g_{11}), \\ G_2 &= p_{12} \Delta g_{12} + p_{112} (g_{II} + \Delta g_{II2}) + p_{32} \Delta g_{32}, \\ G_3 &= p_{13} (g_1 + \Delta g_{13}) + p_{43} \Delta g_{43} + p_{23} \Delta g_{23}, \\ G_4 &= p_{14} \Delta g_{14} + p_{114} (g_{II} + \Delta g_{II4}) + p_{34} \Delta g_{34} + p_{14} (g_1 + \Delta g_{14}). \end{aligned} \quad (5.17)$$

Кількість рівнянь дорівнює числу невідомих. Це лінійна система і з її рішення необхідно знайти невідомі g_1, g_2, g_3 і g_4 .

Розглянемо цю систему в числах на прикладі рис. 5.5. Від твердих значень g у пунктах I і II одержимо передачею в сусідні пункти початкові значення:

$$\begin{aligned} g_1 &= g_I + \Delta g_{11} = 980945.10 + 0.15 = 980945.25, \\ g_2 &= g_{II} + \Delta g_{II2} = 980940.20 + 1.20 = 980941.40, \\ g_3 &= g_I + \Delta g_{13} = 980945.10 + 1.10 = 980946.20, \\ g_4 &= g_{II} + \Delta g_{II4} = 9809420.40 \text{ мГал.} \end{aligned}$$

У точки 1, 2, 3, 4 значення g можна передати іншим шляхом і одержати декілька значень, що відрізняються в цих пунктах. У даному випадку це тільки початкові значення для g_1, g_2, g_3, g_4 . Значення вузлів у згоді з (5.17) можна записати:

$$\begin{aligned}
G_1 &= 1 \cdot 4.00 + 1 \cdot 3.10 + 1 \cdot (980945.10 + 0.15), \\
G_2 &= 1 \cdot (-4.00) + 1 \cdot (980940.20 + 0.20) + 3 \cdot (-5.10), \\
G_3 &= 1 \cdot (980945.10 + 0.10) + 2 \cdot 4.05 + 3 \cdot 5.10, \\
G_4 &= 1 \cdot (-3.10) + 1 \cdot (980940.20 + 2.20) + 2 \cdot (-4.05) + 2 \cdot (980945.10 - 2.80).
\end{aligned}$$

Рішення системи привело до наступних значень: $g_1=980945.32$, $g_2=980941.30$, $g_3=980946.35$, $g_4=980942.32$ мГал. Звичайно, рішення з використанням інших початкових значень може дати результати, які трохи розрізняються.

Відзначимо, що система (5.16) незручна для рішення, тому що в неї входять великі числа – абсолютні значення g у точках. Тому часто пропонується рішення системи рівнянь не для знаходження абсолютних значень g , а поправок до наближених значень сили ваги. Правила складання рівнянь для цього випадку можна знайти в спеціальній літературі [1, 5 та ін.].

5.1.3. Оцінка точності спостережень на зв'язках опорної мережі

За результатами вирівнювання можна оцінити погрішність вимірів Δg на зв'язках опорної мережі. У якості її характеристики використовують середньоквадратичну погрішність ε вимірюваних приростів на зв'язках мережі. Для розрахунків складається відповідна таблиця поправок до приростів δ на кожен зв'язок. При вирівнюванні методом полігонів значення цих поправок знаходяться безпосередньо при рішенні системи рівнянь. У методі вузлів поправка до приросту одержується як різниця значення Δg на зв'язку до вирівнювання і після нього: $\delta = \Delta g - \Delta g_{\text{вир}}$.

Величина середньоквадратичної погрішності одиничного виміру (виміру з одиничною вагою) визначається за формулою:

$$\varepsilon_l = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^s p_i \delta_i^2}{s - r}}, \quad (5.18)$$

де p_i , δ_i – відповідно вага і поправка до приросту i -того зв'язку мережі, s – кількість зв'язків в опорній мережі, r – число нетвердих пунктів у мережі.

Середньоквадратична погрішність вимірюваних приростів Δg на зв'язках мережі з урахуванням їх ваги дорівнює:

$$\varepsilon_{zg} = \frac{\varepsilon_l}{\sqrt{p_{\text{сер}}}}, \quad (5.19)$$

де $p_{\text{сер}}$ – середня вага зв'язку мережі.

5.2. Порядок виконання роботи

Студенту видається індивідуальне завдання: схема опорної гравіметричної мережі, що підлягає вирівнюванню. Він вибирає метод вирівнювання, виконує необхідні перетворення мережі і складає необхідну систему лінійних рівнянь. Він може зробити це за аналогією з двома прикладами, розглянутими в даній роботі. За результатами вирівнювання на схему виносяться зрівняні зна-

чення сили ваги в пунктах опорної мережі, а також знаходиться середньоквадратична помилка зв'язку цієї мережі.

5.3. Звіт про роботу

За результатами роботи складається короткий звіт із вказівкою вихідної гравіметричної мережі, методу вирівнювання і системи рівнянь. Приводяться також результати вирівнювання опорної гравіметричної мережі. Оцінюється середньоквадратична погрішність зв'язку вирівняної мережі.

5.4. Контрольні питання

1. Назвіть критерії необхідності вирівнювання опорної мережі.
2. По яким даним устанавлюється вага зв'язку в опорній мережі?
3. Які опорні гравіметричні мережі називаються вільними, а які невольними?
4. Що таке нев'язка полігона?
5. Які обмеження до конфігурації мережі накладаються при вирівнювання її методом полігонів?
6. Яка ідея покладена в основу складання системи лінійних рівнянь при вирівнювання опорних мереж методом полігонів?
7. Яка ідея покладена в основу складання системи лінійних рівнянь при вирівнювання опорних мереж методом вузлів?
8. Як оцінити точність вимірів на зв'язках опорної мережі?

6. ОБЧИСЛЕННЯ АНОМАЛІЙ СИЛИ ВАГИ, СКЛАДАННЯ КАТАЛОГУ ГРАВІМЕТРИЧНИХ ПУНКТИВ, ПОБУДОВА КАРТ ИЗОАНОМАЛ

Мета роботи. Вивчити методи обчислення аномалій сили ваги в різних редукаціях, скласти каталог пунктів гравіметричних вимірів, а також освоїти методи графічного зображення аномалій сили ваги

6.1. Зміст роботи

Обробка гравіметричних вимірів, яка описана у розділі 4, закінчувалась обчисленням спостережених значень сили ваги $g_{\text{спос}}$ у пунктах зйомки. В цьому розділі описаний заключний етап обробки гравіметричних спостережень з ціллю обчислення аномальних значень сили ваги. Для обчислення аномальних значень сили ваги крім спостережених значень сили ваги необхідні деякі топографо-геодезичні дані: висота h пунктів над рівнем моря та їх планове положення. При детальних зйомках зазвичай використовують прямокутні координати X і Y точок, що задаються в метрах. При дрібномасштабних зйомках – географічні координати φ (широта) і λ (довгота) точок. Ці значення задаються в градусах, мінутах і секундах. На заключному етапі обробки гравіметричних вимірів обчислюються аномалії сили ваги Δg_a . Вони знаходяться зазвичай за наступною схемою

$$\Delta g_a = g_{енос} + \sum_{n=1}^N P g_n - \gamma_0, \quad (6.1)$$

де $\sum_{n=1}^N P g_n$ – сума N поправок (редукцій) за вплив факторів, що заважають – висоту

точки спостереження, рельєф денної поверхні та ін., γ_0 – нормальне значення сили ваги. Поправка $P g_h$ вводиться за вплив висоти h між рівнем моря, прийнятим за поверхню теоретичної Землі, і точкою спостереження (рис. 6.1). При введенні цієї поправки враховується зміна нормальної сили ваги з висотою. Вертикальний градієнт нормальної сили ваги дорівнює

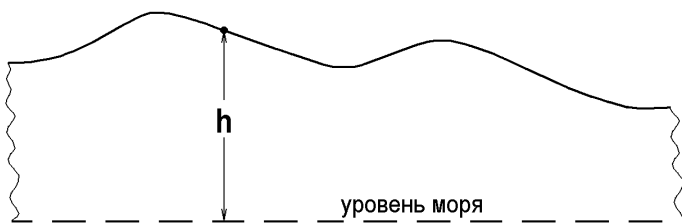


Рис. 6.1. До пояснення поправки за висоту

Вертикальний градієнт нормальної сили ваги дорівнює

$$\frac{\partial \gamma_0}{\partial h} = -0.3086 \frac{\text{мГал}}{\text{м}} \quad (6.2)$$

Так що поправку за висоту Δg можна знайти

$$P g_h = 0.3086 h, \quad (6.3)$$

де h – висота точки над рівнем

моря в метрах. Вводиться також поправка $P g_{сл}$ за тяжіння шару потужністю h між рівнем моря і точкою спостереження (рис. 6.2). Приймається, що проміжний шар із щільністю σ обмежений горизонтальними площинами і протягається в нескінченно віддалену точку. Притягання нескінченного шару не залежить від положення точки над шаром і визначається тільки його потужністю h

$$g_{шар} = 2\pi k \sigma h = 0.0419 \sigma h, \quad (6.4)$$

де щільність σ у г/см^3 , а висота шару h у метрах. Вплив цього шару треба відняти зі спостереженого поля. Тому у поправці за проміжний шар стоїть знак мінус.

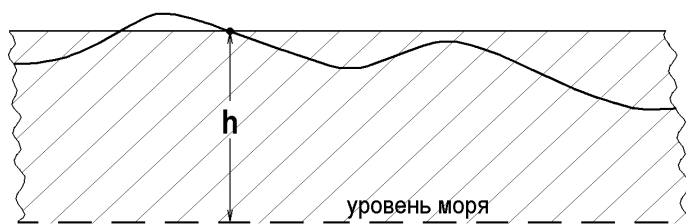


Рис. 6.2. До пояснення поправки за проміжний шар

$$P g_{шар} = -0.0419 \sigma h \quad (6.5)$$

Сумарна поправка за висоту і проміжний шар називається поправкою Буге і записуються

$$P g_B = (0.3086 - 0.0418 \sigma) h \quad (6.6)$$

При обчисленні аномалії по формулі (6.1) необхідно також знати нормальне значення сили ваги на геоїді γ_0 . У нашій країні

γ_0 обчислюється по формулі Гельмерта 1901-1909 рр.

$$\gamma_0 = 978030 (1 + 0.005302 \sin^2 \varphi - 0.000007 \sin^2 2\varphi) - 14 \text{ [мГал]} \quad (6.6)$$

Тут φ – географічна широта пункту спостереження. Поправка -14 введена для приведення до нової Потсдамської системи. Індекс "0" показує, що нормальне значення γ_0 знаходиться для рівня моря (поверхні теоретичної Землі). Формула Гельмерта і в даний час не втратила своєї актуальності. Вона виведена для тео-

ретичної Землі зі стисненням $\alpha = \frac{1}{298,2}$, а в нашій країні в геодезичних роботах

ця поверхня описується поверхнею еліпсоїда Красовського зі стисненням $\alpha = \frac{1}{298,3}$. Крім того, стиснення еліпсоїда з формули Гельмерта близько до су-

часних його значень $\alpha = \frac{1}{298,25}$. Відзначимо також, що від виду застосовуваної

формули нормального поля практично не міняється геологічна ефективність обчислених гравітаційних аномалій. В інших країнах при обчисленні аномалії використовують інші формули, зокрема, міжнародну формулу нормальної сили ваги, рекомендовану в 1971 році XV асамблеєю Міжнародного союзу геофізики і геодезії

$$\gamma_0 = 978031.8(1 + 0.0053024 \sin^2 \varphi - 0.0000059 \sin^2 2\varphi) \text{ [мГал]}. \quad (6.8)$$

Для обчислення значень нормальної сили ваги повинна бути відома географічна широта φ гравіметричного пункту. Її треба підставити у формулу (6.7) чи (6.8). Якщо задані прямокутні координати X і Y , то можна скористатися відповідними формулами або таблицями [7], що перераховують географічні координати в прямокутні.

При обробці гравіметричної зйомки в більшості випадків обчислюються аномалії у вільному повітрі (аномалії Фая) і аномалії Буге. Аномалія у вільному повітрі обчислюється для кожного гравіметричного пункту по формулі

$$\Delta g_{в.п} = g_{сnoc} + 0.3086h - \gamma_0. \quad (6.9)$$

Зміст цієї формули краще зрозуміти, якщо записати її у вигляді

$$\Delta g_{в.п} = g_{сnoc} - (\gamma_0 - 0.3086h).$$

Значення γ_0 обчислюється над рівнем моря, а $g_{сnoc}$ відноситься до фізичної поверхні Землі. Значення нормального поля для фізичної поверхні Землі також можна знайти $\gamma_h = \gamma_0 - 0.3086h$. Тоді аномалія $\Delta g_{св.у}$ знаходиться як різниця спостережених і нормальних полів в одній і тій же точці $\Delta g_{св.в} = g_{набл} - \gamma_h$.

Аномалія Буге знаходиться за формулою

$$\Delta g_B = g_{набл} + 0.3086h - 0.0419\sigma h - \gamma_0. \quad (6.10)$$

Якщо обидві поправки поєднуються в одну поправку Буге, то аномалію зручно обчислювати відповідно до формули

$$\Delta g_B = g_{набл} + (0.3086 - 0.0419\sigma)h - \gamma_0. \quad (6.11)$$

Відзначимо також, що при обчисленні поправки за проміжний шар використовуються два стандартних значення щільності порід цього шару 2.30 г/см^3 і 2.67 г/см^3 . Крім того, часто для геологічної інтерпретації обчислюється аномалія Буге з дійсною щільністю σ на даній ділянці.

6.2. Хід виконання роботи

Студенту видається індивідуальне завдання у виді таблиці, у котрій вказане параметри пунктів гравіметричних спостережень (табл.6.1).

Таблиця 6.1. Приклад завдання для розрахунку гравітаційних аномалій

№№ зп	X, км	Y, км	Широта			Абсолютна сила ваги, мГал	Висота, м
			°	'	''		
Варіант 1							
1	0,00	0,00	48	00	00	980859,55	120,00
2	8,00	0,50	48	00	46	980880,32	110,56
3	16,00	1,00	48	01	32	980850,63	133,82
4	6,50	2,00	48	03	04	980879,14	109,91
5	14,50	2,50	48	03	50	980869,49	122,01
6	5,00	3,50	48	05	23	980880,46	106,50
7	13,00	4,00	48	06	09	980876,68	120,86
8	3,50	5,00	48	07	41	980883,12	102,96
9	11,50	5,50	48	08	27	980875,35	126,05
10	2,00	6,50	48	10	00	980886,25	101,99
11	10,00	7,00	48	10	46	980870,52	130,00
12	0,50	8,00	48	12	18	980889,07	106,17
13	8,50	8,50	48	13	04	980868,78	121,00
14	16,50	9,00	48	13	50	980865,53	143,74
15	7,00	10,00	48	15	23	980875,43	112,44
16	15,00	10,50	48	16	09	980877,06	128,49
17	5,50	11,50	48	17	41	980884,13	106,92
18	13,50	12,00	48	18	27	980889,76	109,20
19	4,00	13,00	48	20	00	980888,79	110,04

Ці дані переносяться в каталог пунктів гравіметричних спостережень. Нижче у таблиці 6.2 надається приклад каталогу гравіметричних пунктів згідно [4]. Нормальне значення γ_0 сили ваги обчислюється по формулі Гельмерта (6.7) за значеннями φ для кожної точки.

Таблиця 6.2. Приклад каталогу гравіметричних пунктів

район робіт: Дніпропетровська областьрік робіт: 2015тип и номер гравиметра: ГНУК-С, № 345

№№ гравіметричних пунктів	Географічні координати		Висота пунктів, м	Спостережене значення сили ваги, мГал	Нормальне значення сили ваги, мГал	Аномалія у вільному повітрі, мГал	Аномалія Буге, мГал	
	Широта φ	Довгота λ					$\sigma_{\text{шар}}^{\text{=}}$ 2.30 г/см ³	$\sigma_{\text{шар}}^{\text{=}}$ 2.67 г/см ³
I	49°24	36°51,5	80.22	981005.72	980998.79	31.69	23.98	22.71
II	49°23,5	36°55	81.40	008.31	998.01	35.41	23.80	26.29
III	49°24	36°58	83.51	010.84	998.79	38.76	30.72	29.43
IV	49°22	36°51	82.78	009.32	995.76	39.11	31.15	29.84
V	49°21,5	36°54	84.16	010.20	995.07	41.10	41.10	31.67
VI	49°22	37°03	84.19	014.60	995.76	44.82	36.73	35.39
VII	49°20,5	36°52	85.14	013.40	993.51	46.16	37.97	36.66
VIII	49°21	36°57	86.21	016.10	994.29	48.41	40.12	38.75

У випадку обробки великої кількості пунктів можна значення γ_0 обчислити тільки для північної і південної границь карти і лінійною інтерполяцією побудувати ізолінії нормального поля. Потім зняти значення γ_0 для кожного гравіметричного пункту і занести в каталог у стовпчик 6. За значеннями $g_{\text{енос}}$, h і γ_0

обчислюються аномалії: у вільному повітрі, Буге при двох значеннях щільності 2.30 г/см^3 і 2.67 г/см^3 . Результати заносяться в стовпчики 7, 8, 9 каталогу.

Гравиметрическая карта

редукція Буге, плотність проміжоточного слоя $\sigma=2,67 \text{ г/см}^3$

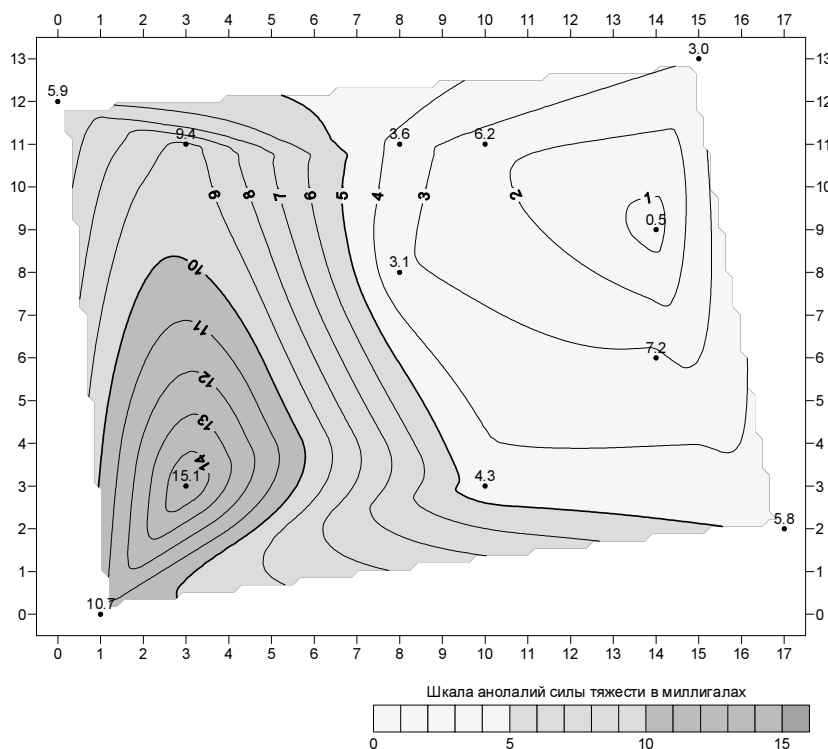


Рис. 6.3. Приклад побудови карти ізоаномал

Результати обчислення аномалій сили ваги зображуються графічно у виді карт ізоаномал – аномалій у вільному повітрі і Буге (рис. 6.3). Для цього кожному пункту спостереження приписується значення аномалії Δg . Так як зйомка дрібномасштабна, на картах аномалії вписані з точністю до 0.1 мГал. Ізоаномали проводять шляхом лінійної інтерполяції між пунктами спостереження. При цьому спочатку виконується триангуляція і строга інтерполяція значень аномалій між пунктами, а потім ізолінії згладжуються в межах фактичної середньо-

квадратичної погрішності аномалій. Зазвичай перетин ізоліній пропорційний середньоквадратичної погрішності даних. Згідно [4] у гравірозвідці він 2,5 рази більш ніж середньоквадратична погрішність. У завданні дана зйомка масштабу 1:100000, тому ізоаномали проводять через 1 мГал [4]. А це значить, що за величину середньоквадратичної погрішності можна прийняти 0.4 мГал й на неї слід орієнтуватись при згладжуванні ізоліній. Карти ізоаномал розфарбовуються в різні відтінки зеленого (негативні значення), жовтого (значення близькі до нуля) і коричневого (позитивні значення) кольорів.

6.3. Звіт про роботу

Коротко описуються етапи виконання роботи і приводяться необхідні формули. Додається вихідна карта фактичних даних, каталог гравіметричних спостережень і побудовані карти ізоаномал сили ваги у вільному повітрі і редукції Буге.

6.4. Контрольні питання

1. Обґрунтуйте необхідність введення поправок при обчисленні аномалій сили ваги
2. Які основні поправки вводяться при обчисленні аномалій сили ваги?
3. Як знайти нормальне поле в точці спостереження?

4. По якій формулі обчислюються гравітаційні аномалії у вільному повітрі?
5. По якій формулі обчислюється аномалія сили ваги в редукції Буге?
6. Висота точки спостереження 2 км над рівнем моря. Знайти, наскільки аномалія у вільному повітрі відрізняється від аномалії Буге для щільності проміжного шару 2.67 г/см^3
7. Поправка за висоту в точці спостереження склала 60 мГал. Знайти висоту точки над рівнем моря

ЛІТЕРАТУРА

Основна:

1. Варламов А.С. Уравнивание гравиметрических наблюдений / А.С. Варламов. – М.: Недра, 1980. – 160 с.
2. Веселов К.Е. Гравиметрическая съемка / К.Е. Веселов. – М.: Недра, 1986. – 312 с.
3. Гравиразведка: Справочник геофизика / Под ред. Е.А. Мудрецової, К.Е. Веселова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 607 с.
4. Инструкция по гравиметрической разведке. – М.: Недра, 1975. – 88 с.
5. Миронов В.С. Курс гравиразведки / В.С. Миронов. – Л.: Недра, 1960. – 543 с.
6. Попов В.В. Уравнивание полигонов / В.В. Попов. – М.: Геодиздат, 1954. – 159 с.

Додаткова:

7. Веселов К.Е. Гравиметрическая разведка / К.Е. Веселов, М.У. Сагитов. – М.: Недра, 1968. – 512 с.
8. Граф А. Гравиметр. Принципы измерения. Конструкция, техника измерения / А. Граф. – М.: Геодиздат, 1961. – 111 с.
9. Шокин П.Ф. Гравиметрия / П.Ф. Шокин. – М.: Геодиздат, 1960. – 316 с.

Логвін Василь Миколайович

**ВИМІР ПОЛЯ СИЛИ ВАГИ ЗА ДОПОМОГОЮ ГРАВІМЕТРІВ
ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ СПОСТЕРЕЖЕНЬ**

**Методичні рекомендації до лабораторних робіт
з дисципліни «Гравірозвідка»**

**для студентів спеціальності 103 Науки про Землю
спеціалізації «Геофізика»**

Видано в редакції автора

Підписано к виданню 15.03.2018.
Електронний ресурс

НТУ «Дніпровська політехніка»
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.