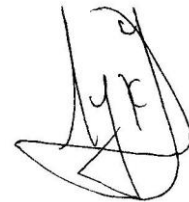


Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Львівська політехніка»

Лук'янченко Юрій Олександрович



УДК 528.21+ 528.22

**Застосування супутникових та наземних даних для побудови
моделей гравітаційного поля Землі**

Спеціальність 05. 24. 01 Геодезія, фотограмметрія та картографія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів - 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Марченко Олександр Миколайович,
професор кафедри вищої геодезії та астрономії
Національного університету «Львівська політехніка».

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Железняк Олег Олександрович,
завідувач кафедри аерокосмічної геодезії
Національного авіаційного університету,
м. Київ.

кандидат технічних наук
Кучер Олег Васильович,
перший заступник директора з наукової роботи
Науково-дослідного інституту геодезії та картографії,
м. Київ.

Захист відбудеться «27» травня 2016 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.12 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 502 II навч. корп.).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «19» квітня 2016 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради, к.т.н., доцент



Б. Б. Паляниця

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми: новим кроком у розвитку супутникових технологій стала місія GOCE. Тут вперше було реалізовано метод супутникової градієнтометрії (2009 рік), тобто було отримано тип інформації для побудови гравітаційних моделей, який до цього часу лише обчислювався. Цей тип інформації – супутникові гравітаційні градієнти. Такі дані мали б покращити гармоніки у середніх та довгих хвилях потенціалу сили тяжіння.

Провідними структурами в даних питаннях вважаються: ICGEM (International Centre for Global Earth Models) Міжнародний Центр Глобальних Моделей, який є однією з гілок IAG (International Association of Geodesy) Міжнародна Асоціація Геодезії), також, він є провідною структурою при моделюванні глобального гравітаційного поля Землі; GFZ (GeoForschungsZentrum), що займається безліччю питань зв'язаних з геодинамікою, гравітаційним полем та іншим; NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) одна з основних служб Сполучених Штатів Америки, одним з основних завдань якої є моніторинг поверхні Світового океану, що дуже тісно пов'язано з гравітаційним полем Землі; ESA (European Space Agency) Європейська Космічна Агенція, одна з провідних світових структур в галузі космічних технологій, якій безпосередньо належить реалізація місії GOCE.

Другим важливим аспектом актуальності роботи є те, що ці дані дуже щільно розташовані у часі та просторі, порівняно з наземними типами даних. Так за 3 роки було накопичено близько 100 мільйонів точок з даними. Виникає проблема їх ефективного сумісного опрацювання. У роботі наведено алгоритм для визначення гармонічних коефіцієнтів, який вносить певні модифікації, що порівняно із класичними методами надає йому певні переваги, а саме: зменшується час обчислень та зменшуються необхідні комп'ютерні потужності. Це стає актуально, оскільки кількість інформації весь час зростає, що веде за собою збільшення затрат часу та комп'ютерних ресурсів для її опрацювання.

Основними експертами у питаннях побудови моделей гравітаційного поля вважаються: C. C. Tscherning, J. Bouman, P. Visser, R. Koop, O. L. Colombo, P. Ditmar, A. Eicker, T. Gruber, C. Jekeli, R. Pail, R. Rummel, F. Barthelmes, S. Bruinsma, J. Brockmann, C. Forste, Th. Grombein, H. Moritz, J. Muller, R. Rapp, P. Schwintzer, N. Sneeuw, П. Зазуляк, О. Марченко. В Україні на сьогоднішній день питання моделювання глобального гравітаційного поля Землі є на стадії розвитку. Провідною структурою в даній сфері в Україні можна відзначити лабораторію ГНДЛ-97 Національного Університету «Львівська політехніка».

Таким чином, для побудови моделі використовуються дані супутникової градієнтометрії та інформація про аномалії сили тяжіння у вільному повітрі. Це дає змогу говорити про комбінований розв'язок, який базується на різнотипній інформації і втілений у побудові глобальної комбінованої гравітаційної моделі Землі. На сучасному етапі вже є досить багато типів вхідної інформації, яка використовується для визначення гармонічних коефіцієнтів. До цих типів даних належать: аномалії у вільному повітрі визначені на Земній поверхні,

супутникова градієнтометрія та альтиметрія, морська гравіметрія та ін., всі вони так чи інакше характеризують гравітаційне поле. Але найдостовірніший розв'язок може дати лише комбінація цих даних. Одна з версій такої комбінації представлена в даній роботі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами: розробки автора використовувались в рамках науково-дослідної роботи Національного університету «Львівська політехніка»: «Комплексна геодинамічна модель гравітаційного поля і деформацій земної кори регіону Чорного моря за супутниковими даними», («Геоїд»), (заключний), номер держреєстрації 0111U001213.

Мета і задачі дослідження: дана робота націлена на вдосконалення існуючих методів побудови моделей гравітаційного поля Землі та сумісне використання різнотипної інформації. За останнє десятиліття дуже сильного розвитку набули супутникові місії (і не тільки Земні). До них можна віднести велику кількість альтиметричних супутників, супутники класу LEO (Low Earth Orbit) (особливо місія GOCE), загальноземні навігаційні супутникові системи та безліч космічних місій, які запуснені з метою вивчення гравітаційних полів інших космічних об'єктів. Всі ці проекти поєднує одна властивість, а саме - велика кількість даних, які отримуються в результаті їх функціонування. Саме з цієї причини основною задачею роботи є розробка алгоритму, який дозволить ефективніше використовувати наявні масиви різнорідних даних для побудови моделей гравітаційного поля Землі. Основний акцент поставлено на побудові комбінованого розв'язку та розробці регулярної сітки, яка б дозволила значно спростити обчислення нормальних рівнянь та їх розв'язання. Для досягнення ефективного результату в роботі використовуються дані супутникової градієнтометрії та набір аномалій сили тяжіння, що дають змогу отримати комбінований розв'язок. Отже, в роботі поставлено такі основні задачі:

- Удосконалення методів оптимального використання первинних даних супутникової градієнтометрії (редукування даних, усунення шуму методами фільтрації, приведення даних на регулярну сітку).
- Розроблення алгоритму швидкого обчислення гармонічних коефіцієнтів при використанні великої кількості даних.
- Побудова комбінованої моделі гравітаційного поля Землі.

Об'єкт дослідження: гравітаційне поле Землі.

Предмет дослідження: моделювання гравітаційного поля Землі.

Методи дослідження: у роботі використовувались методи інтерполяції та усереднення для формування масиву вхідної інформації, методи фільтрації цифрових сигналів для стабілізації отриманого розв'язку, методи матричної алгебри для виконання основних обчислень, методи картографічного проектування для ефективно представлення даних. Усі обчислення велись із застосуванням методів програмування (Fortran, Delphi) на персональному комп'ютері.

Наукова новизна одержаних результатів: оскільки, кожна модель будується в залежності від вхідних даних, то від цього залежить і спосіб її

побудови і максимальна точність та роздільна здатність, з якою вона зможе відобразити гравітаційне поле. Для побудови комбінованої моделі використовуються новітні дані супутникової градієнтометрії, отримані завдяки місії GOCE та сучасний набір аномалій сили тяжіння DTU 10, що дає змогу уточнювати попередні результати у даній галузі. Для опрацювання цих даних пропонується антиподно-рівномірна сітка, яка дає змогу використовувати певні ортогональні властивості, що в свою чергу дозволяють розбити матрицю нормальних рівнянь на окремі частини, кожна з яких дає змогу незалежно визначити певні набори гармонічних коефіцієнтів певного ступеня, що значно пришвидшує процес обчислень. Цим даний підхід відрізняється від способу декомпозиції Халецького, який переважно застосовується ESA для побудови гравітаційних моделей за даними GOCE. Побудовано комбінований розв'язок для моделі глобального гравітаційного поля Землі з використанням новітніх даних супутникової градієнтометрії та аномалій сили тяжіння.

Практичне значення одержаних результатів: важливим практичним аспектом є те, що модель гравітаційного поля Землі високої роздільної здатності безпосередньо дозволяє отримувати нормальні висоти із GNSS спостережень. Також дана робота спрямована на зменшення часу опрацювання та зменшення необхідних комп'ютерних потужностей під час визначення гармонічних коефіцієнтів на основі великої кількості даних. Це дуже важливо, оскільки максимально якісний розв'язок можна отримати, використовуючи максимальну кількість вхідної інформації. У свою чергу, ця максимальна кількість є обмежена максимальною потужністю комп'ютерних ресурсів. Тому на практиці даний алгоритм дає змогу працювати з великою кількістю даних не використовуючи супер-комп'ютери. В цілому це дало змогу отримати модель LP - 04C з роздільною здатністю до 720 ступеня/порядку. Важливо зазначити, що часто науковці експериментують із алгоритмами, які використовуються при побудові моделі гравітаційного поля і тому доводиться повторювати процес обчислень. У цьому випадку застосування даної методики, має важливе значення, оскільки суттєво скорочує час очікування між різними тестами тих чи інших алгоритмів.

Особистий внесок здобувача: автором розроблено та запрограмовано алгоритм побудови антиподно-рівномірної сітки та її розбиття на 8 частин; спосіб розбиття матриці нормальних рівнянь з використанням ортогональних властивостей, що виникають внаслідок представлення вхідної інформації способом, запропонованим автором; також виконані дослідження по редукуванню гравітаційних градієнтів на сферичну поверхню; запропоновано принцип комбінації супутникових та наземних даних, який втілюється у комбіновану модель гравітаційного поля Землі, побудовану за цим алгоритмом. Всі обчислення виконувались особисто автором.

Окремо автор висловлює подяку Європейській космічній агенції за можливість використання даних місії GOCE та Данському технічному університету за наданий набір аномалій сили тяжіння.

У роботах, опублікованих у співавторстві, дисертантові належать: [7] – постановка задачі, створення алгоритму та виконання основних обчислень, [5] – виконання основних обчислень та порівняння попередніх результатів з методом регуляризації, [2] – підготовка вхідних даних, [1] – постановка задачі, виконання основних обчислень, формування висновків, [6] – підготовка вхідної інформації та деякі ілюстрації.

Апробація результатів дисертації: матеріали дисертаційних досліджень було представлено на 3 міжнародних конференціях, а саме:

- XVI міжнародний науково-технічний симпозіум «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS – технології» (Алушта, 12-17 вересня 2011 р).
- XVIII міжнародний науково-технічний симпозіум «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS – технології» (Алушта, 10 -15 вересня 2013 р).
- V міжнародна наукова конференція «Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища» (Львів, 1 - 4 жовтня 2013 р).

Публікації: за результатами дисертаційних досліджень опубліковано 7 наукових праць, 1 стаття у науковому періодичному виданні України, що входить до міжнародної наукометричної бази, 4 статті у фахових виданнях України та 2 у збірниках конференцій.

Структура та обсяг дисертації: Дисертаційна робота складається із переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел із 110 найменувань. Загальний обсяг дисертації складає 112 сторінок, робота містить 37 рисунків, 4 таблиці та 4 блок-схеми.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, визначено мету, об'єкт, предмет і основні задачі дослідження, розкрито наукову новизну, теоретичне та практичне значення одержаних результатів, наведено зв'язок роботи із науковими програмами. Також розписано особистий вклад автора у опублікованих статтях.

У **першому розділі** «Огляд відомих методів та вибір основних напрямів дослідження» розглянуто методики, які можуть бути використані для моделювання гравітаційного поля Землі. Описано історичний розвиток моделей геопотенціалу. Висвітлено основні методи обчислення гармонічних коефіцієнтів, що є одним із основних питань даної роботи. В кінці розділу зроблено висновки та поставлено основні задачі дисертаційного дослідження.

Варто виокремити місію GOCE, активна фаза вимірювання якої тривала з 2009 по 2013 рр. Більш того, на супутник було встановлено градієнтометр, який вперше забезпечив реальні вимірювання гравітаційних градієнтів на висоті 250 км. На сьогоднішній день тривають активні спроби побудови різних моделей за цими даними, та пошук оптимального їх використання. В цьому

процесі постало багато питань, які виникли при опрацюванні реальних даних і не достатньо розглядались на теоретичному етапі. До таких питань можна віднести: надмірний шум, який присутній у вимірах, продовження потенціалу вниз, приведення інформації на регулярну сітку, ефективне поєднання даних градієнтометрії з уже накопиченою десятиліттями інформацією про гравітаційне поле та інші.

В теорії, задача побудови гравітаційного поля переважно зводиться до розв'язання системи лінійних рівнянь, теорія яких була розроблена набагато раніше, у XVIII – XIX столітті. Одним з найпопулярніших методів розв'язання таких лінійних рівнянь є метод Гауса, в якому матриця нормальних рівнянь зводиться до діагональної, після чого всі подальші обчислення не представляють великої складності. Основною причиною виникнення такого підходу було те, що в ті часи не було змоги обертати великі матриці. Такий метод може бути використаний при розкладі гравітаційного потенціалу в ряд за сферичними функціями, де невідомими є гармонічні коефіцієнти.

Важливим питанням є опрацювання первинних даних супутникової градієнтометрії. А саме: редукування даних, усунення шуму методами фільтрації, приведення даних на регулярну сітку та інше.

На сьогоднішній день доступно досить багато різнотипної інформації про гравітаційне поле Землі, тому важливо поєднати різні типи вимірів для отримання оптимального результату. Таким чином, у роботі ставиться задача використання даних супутникової градієнтометрії для покращення низькочастотної та середньочастотної складової гравітаційного поля Землі. В той же час поставлена задача використання аномалій сили тяжіння для визначення високочастотної складової гравітаційного поля Землі.

Виходячи з цього, основними задачами, які потрібно розв'язати у дисертаційному дослідженні є:

1. Удосконалення методів оптимального використання первинних даних супутникової градієнтометрії (редукування даних, усунення шуму методами фільтрації, приведення даних на регулярну сітку).
2. Розроблення алгоритму швидкого обчислення гармонічних коефіцієнтів при використанні великої кількості даних.
3. Побудова комбінованої моделі гравітаційного поля Землі.

У **другому розділі** «Необхідні теоретичні відомості для моделювання гравітаційного поля Землі» описано матеріал необхідний для розуміння наступних розділів. А саме описано вхідні дані, методи їх фільтрації та редукції, також представлено основні принципи моделювання гравітаційного поля та наведено характеристики за допомогою, яких можна проаналізувати модель геопотенціалу.

Отже, якщо розглядати реальний потенціал сили тяжіння без врахування інших космічних об'єктів, таких як Місяць і Сонце, то реальний потенціал сили тяжіння буде складатися із суми цих двох потенціалів: гравітаційного (притягання) та відцентрового. Позначимо такий реальний потенціал сили тяжіння через W . Обрано назву “потенціал сили тяжіння”, оскільки ми

розглядаємо певну неактивну силу, тобто силу, яка не залежить від самого об'єкта на який вона діє.

$$W = V + \Phi, \quad (1)$$

Де W - потенціал сили тяжіння, V - гравітаційний потенціал, або потенціал притягання, Φ - відцентровий потенціал.

Якщо розбити Землю на елементарні маси, то можна записати потенціал як суму потенціалів цих притягуючих частинок. В інтегральному вигляді це виглядає так:

$$V(x, y, z) = G \iiint_v \frac{\rho(x', y', z')}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}} dx' dy' dz', \quad (2)$$

де x, y, z - координати точки, в якій визначається потенціал, x', y', z' - координати точок, які належать притягуючому тілу, v - область об'єму притягуючого тіла, $\rho(x', y', z')$ - густина в точці, яка знаходиться в середині притягуючого тіла. Оскільки така функція повинна бути гармонічною в зовнішньому просторі, то вона задовольняє рівнянню Лапласа ззовні

$$\nabla^2 V = 0, \quad (3)$$

де $\nabla^2 V$ - лапласіан, який рівний сумі квадратів часткових других похідних,

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}, \quad (4)$$

та рівнянню Пуасона в середині

$$\nabla^2 V = -4\pi G\rho. \quad (5)$$

Такий зовнішній потенціал наближено можна представити як потенціал еліпсоїда обертання, в якого швидкість обертання рівна швидкості обертання Землі, маса Землі рівна масі такого еліпсоїда, його центр знаходиться в центрі мас Землі, та їхні зональні гармоніки другого порядку рівні. Потенціал такого еліпсоїда називають нормальним і позначають через U . Для геодезії є важливими якраз відхилення реального потенціалу W від нормального U . Такий потенціал називається збурюючим і позначається через T .

$$T = W - U. \quad (6)$$

Очевидно, що відцентровий потенціал вже не фігурує в збурюючому. Саме збурюючий потенціал є основним об'єктом досліджень в геодезії. Представимо збурюючий потенціал у вигляді сферичних гармонік:

$$T = \frac{GM}{R} \sum_{n=2}^{N_{\max}} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (\overline{\Delta C}_{nm} \cos(m\lambda) + \overline{\Delta S}_{nm} \sin(m\lambda)) \overline{P}_{nm}(\cos\theta), \quad (7)$$

де $\overline{\Delta C}_{nm}, \overline{\Delta S}_{nm}$ - різниці відповідних гармонічних коефіцієнтів реального та нормального потенціалів. Дане рівняння є загальновідоме і було отримане з розв'язків рівняння Лапласа по кожній з трьох сферичних координат. Такі ж вирази можна записати для реального та нормального гравітаційних потенціалів. Розглядаються гравітаційні потенціали, а не потенціали сили тяжіння, оскільки відцентровий потенціал має однакове значення як для нормального, так і для реального, і при обчисленні збурюючого потенціалу він просто скорочується.

$$W = \frac{GM}{R} \sum_{n=0}^{N_{\max}} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos(m\lambda) + \bar{S}_{nm} \sin(m\lambda)) \bar{P}_{nm}(\cos\theta), \quad (8)$$

$$U = \frac{GM}{R} \sum_{n=0}^{N_{\max}} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm}^* \cos(m\lambda) + \bar{S}_{nm}^* \sin(m\lambda)) \bar{P}_{nm}(\cos\theta), \quad (9)$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta \bar{C}_{nm} \\ \Delta \bar{S}_{nm} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \bar{C}_{nm} - \bar{C}_{nm}^* \\ \bar{S}_{nm} - \bar{S}_{nm}^* \end{array} \right. . \quad (10)$$

За таким же принципом можна розкласти прискорення вільного падіння g :

$$g = \frac{GM}{R^2} \sum_{n=0}^{N_{\max}} (n+1) \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos(m\lambda) + \bar{S}_{nm} \sin(m\lambda)) \bar{P}_{nm}(\cos\theta), \quad (11)$$

Використовуються не лише перші похідні потенціалу, але й другі. Такі похідні разом утворюють тензор градієнтів, який складається із 9 часткових похідних

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_{rr} & V_{r\varphi} & V_{r\lambda} \\ V_{\varphi r} & V_{\varphi\varphi} & V_{\varphi\lambda} \\ V_{\lambda r} & V_{\lambda\varphi} & V_{\lambda\lambda} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

Для виконання будь-яких вимірів спочатку необхідно визначити систему координат, в якій будуть проводитись ці виміри. Так і в геодезії існує декілька основних поверхонь. Основною математичною відліковою поверхнею прийнято двоосний еліпсоїд обертання розташований певним чином до тіла Землі. Такий еліпсоїд та встановлене на ньому нормальне значення потенціалу сили тяжіння визначає геодезичну референцну систему.

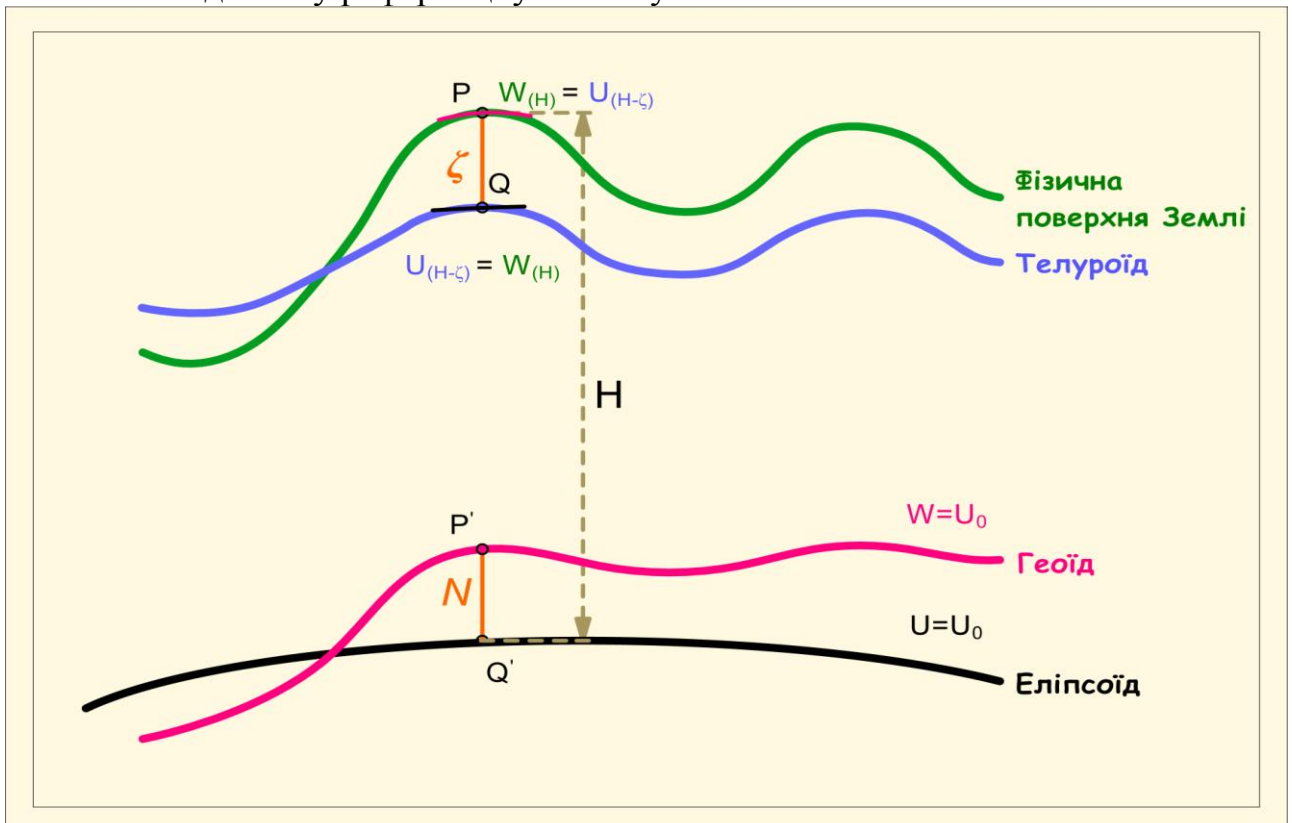


Рис. 1. Основні відлікові поверхні в геодезії.

Еквіпотенціальна поверхня, на якій значення реального потенціалу W рівне значенню нормального потенціалу на еліпсоїді U_0 називається геоїдом. Відхилення геоїда від еліпсоїда називають висотою геоїда і позначають N . Також важливим поняття є поверхня телуроїда.

Телуроїд – це поверхня, на якій значення нормального потенціалу $U_{(Q)}$ рівне значенню реального потенціалу на поверхні Землі $W_{(P)}$. Точки P та Q з'єднуються лінією, яка співпадає із силовою лінією, яка проходить через ці дві точки. Відхилення телуроїда від фізичної поверхні Землі називають аномалією висоти і позначають через ζ . Якщо відкласти такі відхилення від поверхні еліпсоїда то утвориться поверхня квазігеоїда.

Як згадувалось вище основною досліджуваною функцією є збурюючий потенціал, який представляється різницею нормального та реального потенціалів, так і для вимірів прискорення сили тяжіння існує різниця вимірюваного значення g та нормального значення γ , яка називається аномалією сили тяжіння Δg . Протягом того як розвивалась геодезія це поняття змінювало свій сенс, більш того, є декілька його трактувань, розглянемо такі визначення аномалії сили тяжіння у вільному повітрі: класичне визначення та сучасне визначення (в сенсі Молоденського). Аномалія сили тяжіння у вільному повітрі у класичному значенні (змішана аномалія) дорівнює різниці зредукованої реальної сили тяжіння на геоїд та нормальній силі тяжіння на еліпсоїді.

$$\Delta g^{kl} = g_N - \gamma_0. \quad (13)$$

Молодєнський ввів інше визначення аномалії сили тяжіння, яким зараз користуються на практиці. Аномалія сили тяжіння в сучасному сенсі це різниця реальної сили тяжіння на поверхні Землі та нормальної сили тяжіння на телуроїді.

$$\Delta g = g_P - \gamma_Q. \quad (14)$$

Варто зазначити, що ще існує поняття збурення сили тяжіння δg - це різниця реальної сили тяжіння на поверхні Землі та значення нормальної сили тяжіння у цій ж самій точці (чиста аномалія)

$$\delta g = g_P - \gamma_P. \quad (15)$$

Для наочного порівняння моделей гравітаційного поля було використано спектральну щільність, яка відображає внесок кожного окремого порядку. Спектральна щільність для коефіцієнтів, які відображають збурюючий потенціал розраховується так:

$$\sigma_n = \sqrt{\sum_{m=0}^n \bar{C}_{nm}^2 + \bar{S}_{nm}^2}. \quad (16)$$

Таким чином у другому розділі наводяться основні теоретичні відомості про методи та поняття, які стосуються дисертаційного дослідження безпосередньо та використовуються при розв'язанні основних задач, поставлених у першому розділі. Описано базові поняття теорії потенціалу, супутникову градієнтометрію, яка є новим кроком в питаннях дослідження гравітаційного поля Землі, показано основні відлікові поверхні та зв'язок

вимірної сили тяжіння з цими поверхнями, що є важливо при складанні нормальних рівнянь. Також показано спосіб редукції вертикальних гравітаційних градієнтів на сферичну поверхню, що є одним із важливих кроків під час моделювання гравітаційного поля Землі за допомогою методики, яка наведена у даній роботі.

Важливим кроком при роботі з будь-якими вимірами є їх перевірка, тому другий розділ містить пункт, у якому показано деякі методи фільтрації даних. Для вирішення проблеми спільного використання даних пропонується процедура «видалення-відновлення».

Для вирішення третьої задачі (комбінований розв'язок для гравітаційного поля Землі) пропонується техніка «видалення-відновлення», яка дає змогу обчислити низькочастотну та середньо-частотну складову гравітаційного поля Землі за даними супутникової градієнтометрії, а високочастотну за даними аномалій сили тяжіння.

У **третьому розділі** «Оптимізація алгоритму визначення гармонічних коефіцієнтів» наведено особисті напрацювання автора та запропоновані модифікації у методі найменших квадратів, який використовується для моделювання гравітаційного поля Землі.

Визначення C_{nm} та S_{nm} виконується за двома наборами даних, а саме: масиви вертикальних гравітаційних градієнтів та аномалій сили тяжіння. Для знаходження невідомих використовується метод найменших квадратів (параметричний спосіб). Відомо, що кількість параметричних рівнянь рівна кількості вимірів, що в даному випадку буде не мала (більше 20 млн.). Також відомо, що матриця нормальних рівнянь на пряму залежить від кількості невідомих, наприклад, для моделі 360 порядку/ступеня, розмірність такої матриці буде $361^2 \times 361^2$, що досить ускладнює її обертання. Більш того, кожен вимір характеризується трьома координатами. Якщо у випадку Δg вони приведені на сферу і мають постійний радіус-вектор, то про вертикальні гравітаційні градієнти такого сказати не можна (супутник не знаходився постійно на одній висоті).

Отже, зі всього вище сказаного будуть виконуватися такі оптимізації:

- Приведення вертикальних гравітаційних градієнтів на сферичну поверхню, з метою надання радіус-вектору всіх вимірів сталого значення, що спрощує процес подальших досліджень.

- Оскільки кількість невідомих значно менша від кількості вхідних даних, то алгоритм буде базуватися на складанні матриці нормальних рівнянь без попереднього складання матриці параметричних рівнянь.

- Розбиття вхідної інформації на 8 частин з метою ефектинішого її використання.

- Розрідження матриці нормальних рівнянь за допомогою розроблення антиподно-рівномірної сітки, внаслідок чого виникають певні ортогональні властивості.

- Обертання розрідженої матриці нормальних рівнянь, способом її розбиття на певну кількість менших незалежних матриць.

Таким чином третій розділ описує власні напрацювання автора, що дозволяють модифікувати процес визначення гармонічних коефіцієнтів.

Виходячи із поставлених задач, а саме знайти таке розташування точок, щоб воно давало суттєві переваги при подальших обчисленнях, далі буде розроблено антиподно-рівномірний ґрид. Однією з переваг при розташуванні даних на такому ґриді є розріджена система нормальних рівнянь, тобто домінуюча більшість елементів дорівнює нулю. Ще однією перевагою є необхідність використання лише даних першого октанту на сфері, тобто при обчислення елементів матриці нормальних рівнянь потрібно підсумовувати лише 1/8 частину даних від загальної кількості.

Тепер розглянемо властивості рівномірного розташування даних (отримані автором) на паралелі. Якщо на паралелі рівномірно розташовано точки і в кожний квадрант потрапляє однакова кількість цих точок, то можна записати наступні властивості:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^{2N} \cos(m_1 \lambda_i) \cos(m_2 \lambda_i) &= (1 + \delta_{m_1 0} - \delta_{m_1 N}) N \delta_{m_1 m_2} \\ \sum_{i=1}^{2N} \sin(m_1 \lambda_i) \sin(m_2 \lambda_i) &= (1 - \delta_{m_1 0} + \delta_{m_1 N}) N \delta_{m_1 m_2} \\ \sum_{i=1}^{2N} \sin(m_1 \lambda_i) \cos(m_2 \lambda_i) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

де N – кількість точок на меридіані, відповідно $2N$ – кількість точок на паралелі.

Розглянемо властивості приєднаних функцій Лежандра $P_{nm}(\cos \theta)$ та поліномів Лежандра $P_n(\cos \theta)$, які виникають при симетричному дискретному розташуванні точок відносно екватора на меридіані. Оскільки дані функції є парними або непарними то в двох симетричних точках ці функції будуть рівні за абсолютним значенням. Відомо, що поліноми Лежандра з парними індексами є парними функціями, а з непарними – непарними. Для приєднаних функцій Лежандра також діє схоже правило. Якщо сума $n+m$ є парним числом, то дана приєднана функція Лежандра є парною, і навпаки, якщо така сума є непарним числом, то й функція є непарною. З цього можна зробити висновок, що сума добутків $\sum_{i=1}^N P_{n_1 m_1}(\cos \theta_i) P_{n_2 m_2}(\cos \theta_i)$ вздовж меридіана по точках які симетрично розташовані відносно екватора може набувати нульового значення за такої умови $-1^{n_1+n_2+m_1+m_2} < 0$

$$\sum_{i=1}^N P_{n_1 m_1}(\cos \theta_i) P_{n_2 m_2}(\cos \theta_i) = 0, \quad \text{при} \quad -1^{n_1+n_2+m_1+m_2} < 0 \quad (18)$$

Враховуючи ці всі властивості матриця нормальних рівнянь буде розрідженою.

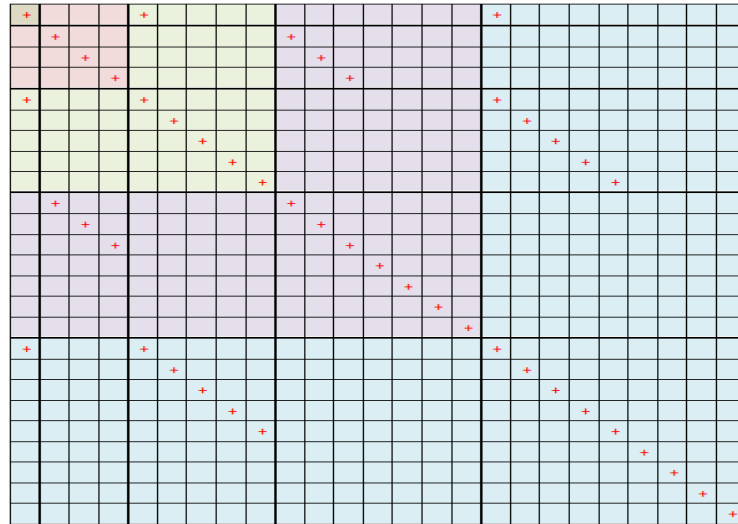
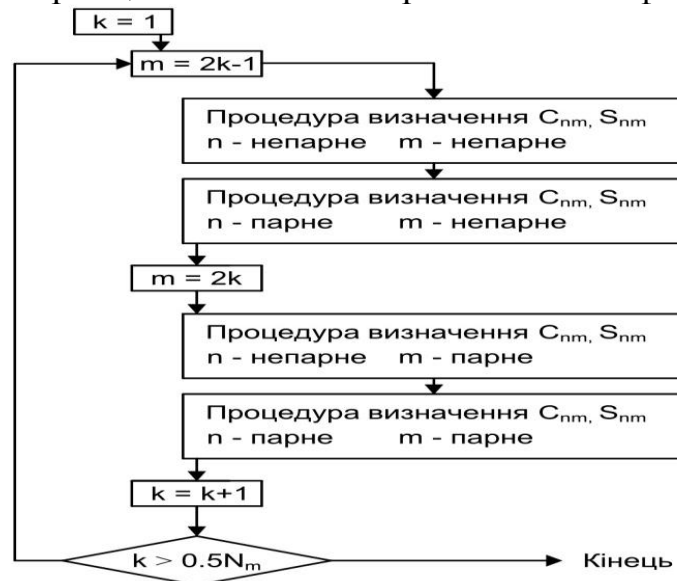


Рис. 2. Структура ненульових елементів матриці нормальних рівнянь. Різними відтінками розмежовуються різні порядки, хрестики вказують на ненульові елементи.

Отже, гармонічні коефіцієнти можна визначати окремими групами, як це показано на блок-схемі (N_m - максимальний порядок).

Блок-схема. Загальний принцип визначення гармонічних коефіцієнтів.



У третьому розділі вирішуються перша та друга основні задачі дисертації, а саме:

- оптимальне використання даних, яке втілилось у редукуванні градієнтів на сферичну поверхню з метою зробити радіус-вектор постійним, що дає змогу використати ортогональні властивості сферичних функцій у дискретному випадку.

- оптимізація алгоритму обчислень, розбиття на 8 октантів вхідної інформації, та використанням ортогональних властивостей, що значно уточнюють та прискорюють процес обчислень.

В результаті розроблено алгоритм складання та розв'язання нормальних рівнянь, який вперше був адаптований до такого представлення вхідної інформації. Що дає можливість у декілька раз пришвидшити сам процес обчислень.

У **четвертому розділі** «Побудова комбінованої моделі гравітаційного поля» реалізовано розроблений алгоритм. Даний розділ є експериментальною частиною дисертації, в якій виконується побудова комбінованої моделі гравітаційного поля. Для цієї побудови використовується певна послідовність дій та використання модифікацій, розроблених автором.

Таким чином, апробація методики втілена в експериментальній побудові моделі гравітаційного поля. Отже, для визначення гармонічних коефіцієнтів та побудови на їх основі квазігеоїда використовується така послідовність дій:

- підготовка вхідних даних;
- редукування гравітаційних градієнтів на сферу;
- видалення апріорної моделі;
- фільтрація даних;
- визначення гармонічних коефіцієнтів на основі даних супутникової градієнтометрії;
- видалення отриманої моделі із даних аномалій сили тяжіння;
- побудова остаточного комбінованого розв'язку моделі гравітаційного поля Землі;
- побудова наближеного квазігеоїда за комбінованою моделлю з метою її апробації.

Для побудови супутникової моделі вхідними даними є набір вертикальних гравітаційних градієнтів V_{zz} виміряних вздовж супутникових трас. В опрацювання взято дані за період 2012 року, що становить 27,063,905 точок спостереження. На рис. 3 представлено розподіл вхідних даних, а в табл. 1 приведено характеристики вхідного набору даних.

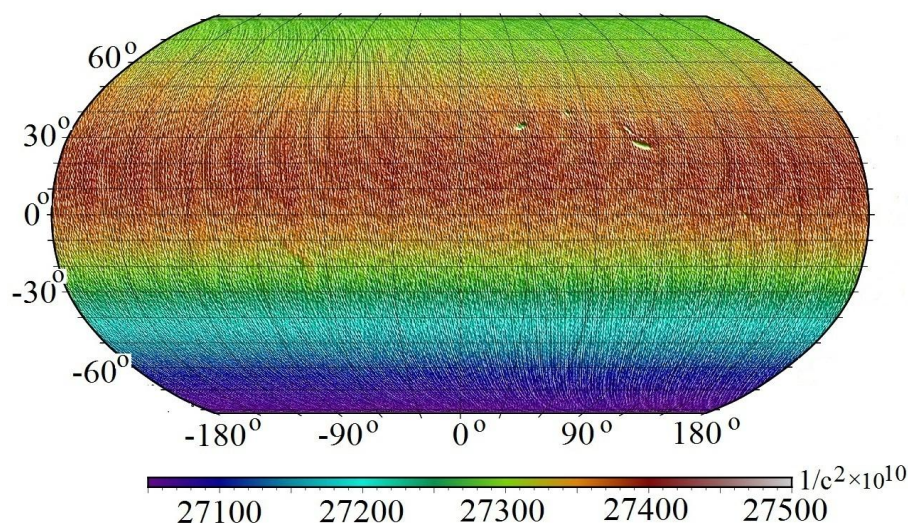


Рис. 3. Розподіл вхідних гравітаційних градієнтів.

Характеристики набору вхідної інформації

	Мінімальне	Максимальне	Середнє
Широта, (°)	-83.41578499	83.415452937	-0.1085540428
Довгота, (°)	-179.99999068	179.999998250	-0.7165846641
Радіус-вектор, (м)	6608094.716	6649059.647	6633820.850
Вертикальний градієнт (1/С ²)	0.269601419E-05	0.275837525E-05	0.272680334E-05

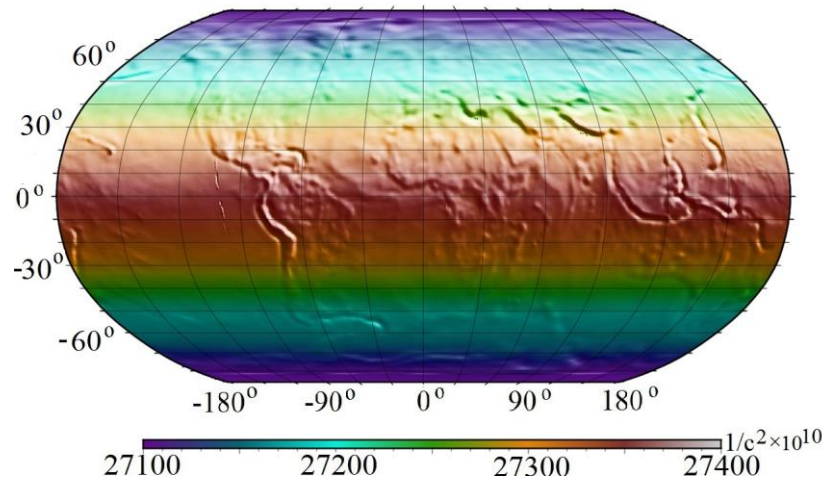


Рис.4. Редуковані градієнти на сферу радіусом $a = 6637000$, поправки моделювались за допомогою моделі `go_cons_gcf_2_spw_r2` 180 порядку/ступеня.

В результаті визначення гармонічних коефіцієнтів та їх відновлення було обрано один варіант моделі (робоча назва `GOCE_FFT400/120`). Такою моделлю став розв'язок, який будувався на основі фільтрованих даних методом FFT 400/120 (довжини хвиль менші 120 кілометрів відкидались, довжини хвиль більше 400 кілометрів лишались без змін, а ті які потрапили посередині цих двох границь були згладжені за допомогою фільтра Гауса).

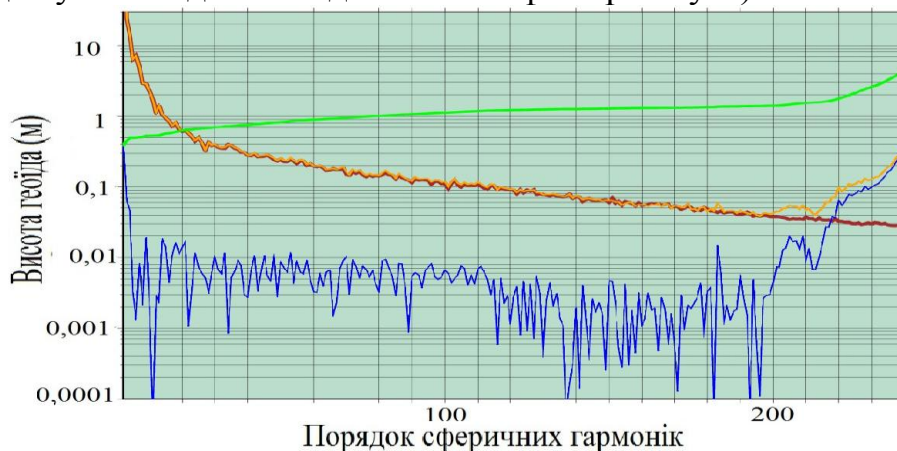


Рис. 5. Порівняння спектральної щільності моделі `GOCE_FFT400/120` та `EIGEN-6C2` (сигнал моделі `EIGEN-6C2` позначено коричневим кольором, сигнал моделі `GOCE_FFT400/120` позначено помаранчевим кольором, різниці відповідних порядків цих двох моделей – синій, акумульовані різниці – зелений).

Для побудови остаточної моделі використовувались аномалії сили тяжіння DTU10. Оскільки в роботі поставлена задача комбінованого розв'язку то з цих даних були вилучені аномалії, змодельовані за допомогою супутникової моделі.

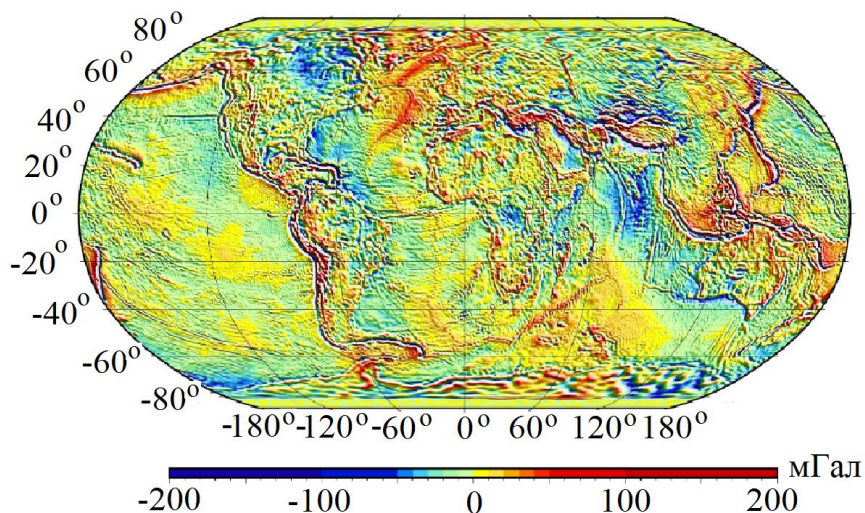


Рис.6. Аномалії сили тяжіння у вільному повітрі (розв'язок для всієї Землі DTU10).

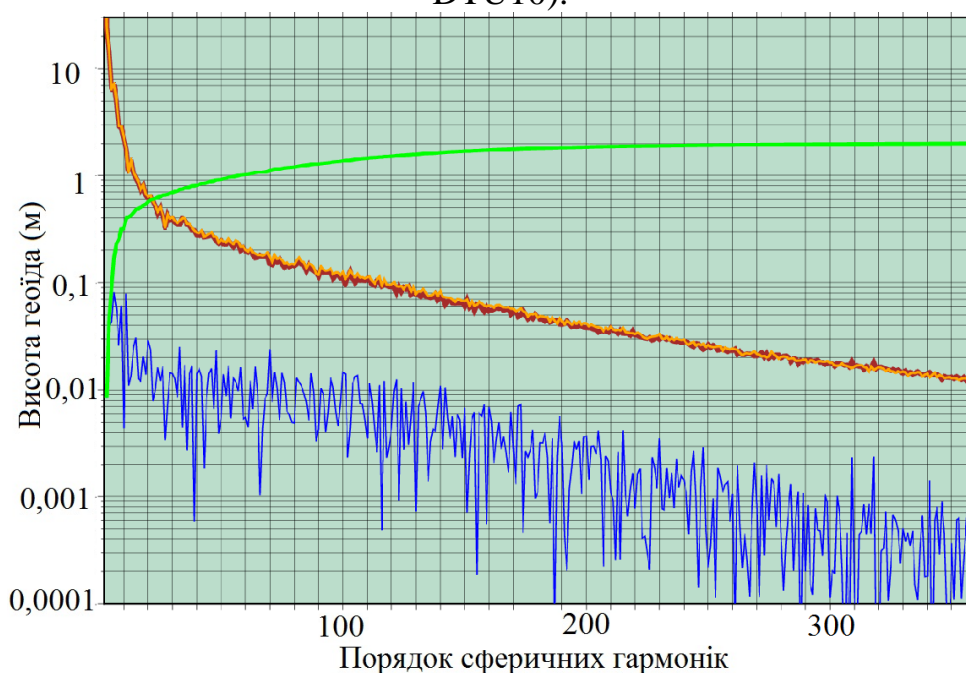


Рис. 7. Порівняння спектральної щільності моделей LP-04C(360) – помаранчевий та EIGEN – 6C2 – коричневий. (усереднені вхідні дані).

Для перевірки моделі, було виконано порівняння побудованих за моделлю аномалій сили тяжіння з аномаліями DTU10. Отримане стандартне відхилення становить 21 мгал, що майже в два рази краще за попередній супутниковий розв'язок, для якого стандарте відхилення становило 38 мгал.

Також, запропонований алгоритм було випробувано для побудови моделі 720 порядку/ступеня LP-04C(720).

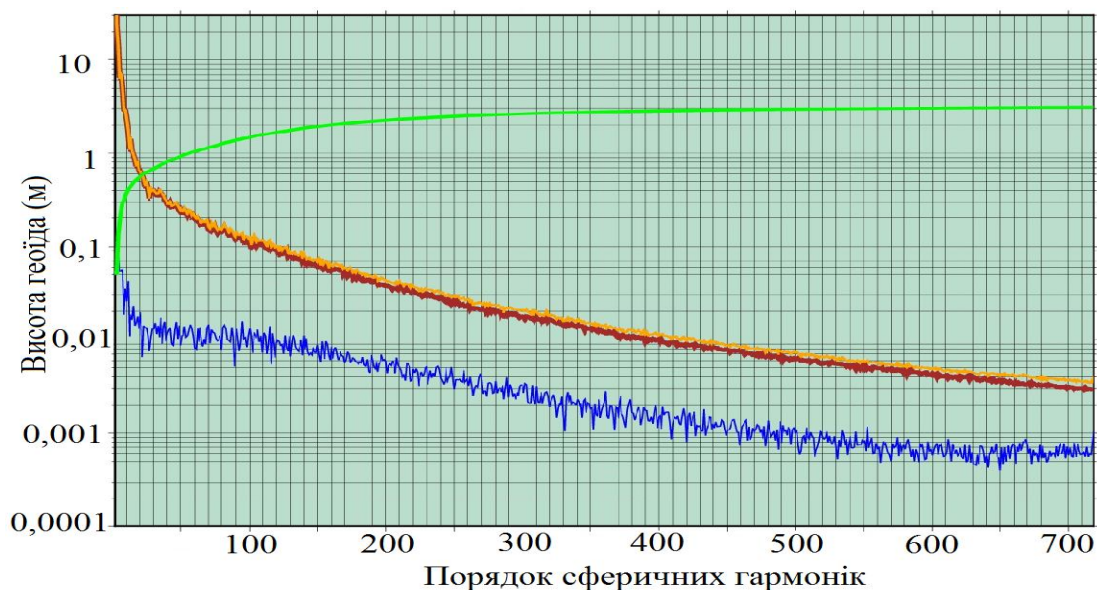


Рис. 8. Порівняння спектральної щільності моделей LP-04C(720) – помаранчевий та EIGEN – 6C2 – коричневий.

В даному розділі експериментально підтверджено ефективність теорії розробленої автором в 3 розділі. А саме, побудовано комбіновані моделі гравітаційного поля Землі LP-04C 360 порядку/ступеня LP-04C 720 порядку/ступеня. Здатність використовувати даний метод для побудови гравітаційних моделей 720 порядку/ступеня різко виділяє його серед більшості інших методів, які дозволяють будувати моделі, обмежені 360 порядком/ступенем. Достовірність методики підтверджується апробацією отриманої моделі LP-04C 360 порядку/ступеня на двох незалежних масивах даних. У першому випадку за допомогою побудованої моделі було змодельовано аномалії сили тяжіння на всю Землю із кроком $30' \times 30'$ на точки, у яких відомі аномалії сили тяжіння DTU10. Стандартне відхилення різниць цих двох наборів показало 21 мгал. У другому випадку було обрано полігон GNSS-нівелювання Нью Мехіко із відомими висотами квазігеоїда. Далі на ці пункти було побудовано висоти квазігеоїда за отриманою автором моделлю. Стандартне відхилення різниць цих двох наборів висот показало 50 см, а у випадку порівняння лише залишків таких висот (тобто у разі видалення трендової частини до 180 порядку) було отримано стандартне відхилення 4 см. Така апробація на двох незалежних масивах даних дає змогу говорити, що поставлені задачі у першому розділі було успішно виконано. А саме: ефективне використання вертикальних градієнтів, яке втілилось в процедурі редукування їх на сферичну поверхню, оптимізація алгоритму визначення гармонічних коефіцієнтів, яка представлена розробленим автором методом розбиття вхідних даних на 8 октантів та розбиття матриці нормальних рівнянь на частини та третя задача – побудова комбінованого розв'язку.

Загальні висновки до роботи

У результаті дисертаційного дослідження було отримано оптимізований алгоритм визначення гармонічних коефіцієнтів геопотенціалу. Цей алгоритм, порівняно із класичними методами, дозволяє швидше будувати та розв'язувати

систему нормальних рівнянь великої розмірності $721^2 \times 721^2$ і вище. Важливо зазначити, що у процесі обчислень унеможливаються похибки накопичення більшості елементів матриці нормальних рівнянь. Також даний метод дає можливість виконати оцінку точності, що не завжди можливо зробити для інших методів.

Основні наукові результати та практичні рекомендації:

1. В роботі розв'язано задачу одночасного опрацювання великої кількості різнотипних даних на персональному комп'ютері з метою визначення гармонічних коефіцієнтів геопотенціалу. Це дає змогу будувати моделі гравітаційного поля Землі 720 порядку/ступеня і вище. Здатність використовувати даний метод для побудови гравітаційних моделей 720 порядку/ступеня різко виділяє його серед більшості інших методів, які дозволяють будувати моделі, обмежені 360 порядком/ступенем. Однак на сьогоднішній день існують моделі порядок, яких досягає 2160, що відповідає роздільній здатності $5' \times 5'$. Отже в майбутньому при збільшенні інформації про гравітаційне поле Землі буде актуальною задача побудови моделі гравітаційного поля Землі (без застосування обчислювальних кластерів), так щоб ця модель забезпечила роздільну здатність не гірше $10 \text{ км} \times 10 \text{ км}$ на поверхні Землі.

2. В роботі використано новітній тип даних – супутникова градієнтометрія GOCE, що є актуально на сьогоднішній день, оскільки ці дані є вперше отримані (процес вимірювання вівся з 2009 по 2013 рік) і дають можливість уточнити існуючі моделі гравітаційного поля Землі.

3. З точки зору практики, дана робота представляє собою надійний інструмент для визначення гармонічних коефіцієнтів при великій кількості різнорідних даних, що важливо, оскільки постійно зберігається тенденція до збільшення роздільної здатності таких моделей, що веде за собою збільшення вхідної інформації. Таким чином даний алгоритм може посприяти більш швидкому розвитку моделей геопотенціалу, оскільки цим питанням зможуть також займатись науковці, у яких немає доступу до потужних обчислювальних кластерів.

4. Розроблено та реалізовано алгоритм редукування вертикальних гравітаційних градієнтів на сферичну поверхню, радіус якої відповідає середній висоті польоту супутника, що дає змогу використати дискретні ортогональні властивості сферичних функцій, що значно прискорює процес обчислень.

5. Оптимізовано алгоритм визначення гармонічних коефіцієнтів, який дозволяє швидше будувати та розв'язувати нормальні рівняння (переваги в швидкості залежить від порядку бажаної моделі), крім того в алгоритмі уникаються похибки накопичення у більшості елементах матриці нормальних рівнянь у процесі їх складання. Також, даний алгоритм залишається стійким при обчисленні високих порядків, тобто не потрібно застосовувати метод регуляризації, який є необхідний для переважної більшості алгоритмів визначення гармонічних коефіцієнтів.

6. Побудовано комбіновану модель LP-04C(360/720), достовірність якої підтверджено на двох незалежних масивах даних. У першому випадку за допомогою побудованої моделі було змодельовано аномалії сили тяжіння на всю Землю із кроком $30' \times 30'$ на точки, у яких відомі аномалії сили тяжіння DTU10. Стандартне відхилення різниць цих двох наборів показало 21 мгал. У другому випадку було обрано полігон GNSS-нівелювання Нью Мехіко із відомими висотами квазігеоїда. Далі на ці пункти було побудовано висоти квазігеоїда за отриманою автором моделлю. Стандартне відхилення різниць цих двох наборів висот показало 50 см, а у випадку порівняння лише залишків таких висот (тобто у разі видалення трендової частини до 180 порядку) було отримано стандартне відхилення 4 см.

7. В процесі дослідження експериментально було підтверджено, що при побудові моделей гравітаційного поля Землі потрібно усереднювати вхідні дані по трапеціям, а не інтерполювати на вузли регулярної сітки. Тобто, якщо певна організація виставляє на загальний показ певний ґрид розроблений нею, то це буде певний дискретний набір, в якому відображається значення в конкретній точці. В такому випадку цей ґрид не можна використовувати для побудови моделі, оскільки для такої моделі потрібно мати ґрид, в якому відображається усереднене значення для окремого елемента, наприклад для трапеції, якщо це звичайний рівномірний географічний ґрид.

8. Запропонований алгоритм може використовуватись для побудови інших моделей гравітаційного поля, які можуть бути використані для уточнення поверхні квазігеоїда України. Знання такої поверхні є дуже важливим, оскільки дає можливість отримувати нормальні висоти із GNSS-спостережень, оскільки нормальні висоти є основними висотами, які використовуються на практиці в Україні на сьогоднішній день. Однак для точного визначення нормальних висот потрібна досить щільна сітка квазігеоїда, де можуть і стати в нагоді уточнені моделі гравітаційного поля Землі, які можна будувати використовуючи запропоновані модифікації в даній роботі.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Стаття у науковому періодичному виданні України, що входить до міжнародної наукометричної бази:

1. Лук'янченко Ю. О. Редукування вертикальних градієнтів сили тяжіння на сферичну поверхню / О. М. Марченко, Ю. О. Лук'янченко – Геодезія, картографія і аерофотознімання, 2014 – № 79. – С. 48-53.

Статті у фахових виданнях України:

2. Лук'янченко Ю. О. Добові розв'язки гармонічних коефіцієнтів 2-го порядку за даними градієнтометра місії GOCE / О. М. Марченко, Н. П. Ярема, О. М. Лопушанський, Ю. О. Лук'янченко - Геодинаміка, 2011 – № 1(10). –С. 22-26.

3. Лук'янченко Ю. О. Попереднє опрацювання супутникових гравітаційних градієнтів місії GOCE / Ю. О. Лук'янченко – Геодинаміка, 2012 – № 1(12). –С. 63-66.

4. Лук'янченко Ю. О. Побудова нормальних рівнянь для опрацювання даних місії GOCE / Ю. О. Лук'янченко – Геодинаміка, 2013 – № 1(14). – С. 34-37.

5. Лук'янченко Ю. О. Визначення зональних гармонічних коефіцієнтів методом регуляризації / О. М. Марченко, Ю. О. Лук'янченко – Геодинаміка, 2013 – № 2(15). - С. 10-12.

Матеріали в наукових виданнях, збірниках наукових доповідей конференцій:

6. Лук'янченко Ю. О. Компоненти тензора інерції Землі за даними місій GRACE і GOCE / Марченко О., Ярема Н., Лопушанський О., Лук'янченко Ю. - Збірник матеріалів, «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS – технології» 12-17 вересня 2011 р, Алушта (Крим) – С. 92-95.

7. Лук'янченко Ю. О. Визначення зональних гармонічних коефіцієнтів / О. М. Марченко, Ю. О. Лук'янченко – Збірник матеріалів XVIII міжнародного науково-технічного симпозиуму «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS – технології », 2013 – С. 330-332.

АНОТАЦІЯ

Лук'янченко Ю. О. Застосування супутникових та наземних даних для побудови моделей гравітаційного поля Землі. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, м. Львів, 2015.

Дисертаційне дослідження спрямоване на удосконалення алгоритму ефективного використання великої кількості різнотипної інформації з метою побудови моделей гравітаційного поля Землі. У роботі використані новітні дані супутникової градієнтометрії GOCE. Запропоновано алгоритм редукування первинних гравітаційних градієнтів на сферичну поверхню. Розроблено антиподно-рівномірну сітку розташування даних та наведено дискретні ортогональні властивості. Розроблено спосіб швидкого складання та розв'язання нормальних рівнянь.

В результаті була побудована комбінована модель гравітаційного поля Землі LP-04C(360/720). Порівняння отриманої моделі із вхідними аномаліями сили тяжіння DTU10 та незалежною інформацією із полігону Нью-Мехіко, де виконувалось GNSS-нівелювання підтвердило доцільність та ефективність запропонованої методики.

Ключові слова: комбінована модель гравітаційного поля Землі, супутникова градієнтометрія GOCE, аномалія сили тяжіння, антиподно рівномірна сітка, ортогональні властивості, великі вхідні масиви даних.

АННОТАЦІЯ

Лук'янченко Ю. А. Применение спутниковых и наземных данных для построения моделей гравитационного поля Земли. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.24.01 - геодезия, фотограмметрия и картография. - Национальный университет «Львівська політехніка» Министерства образования и науки Украины, г. Львов, 2015.

Диссертационное исследование направлено на совершенствование алгоритма эффективного использования большого количества разнотипной информации с целью построения моделей гравитационного поля Земли. В работе использованы новейшие данные спутниковой градиентометрии GOCE. Предложен алгоритм редуцирования первичных гравитационных градиентов на сферическую поверхность. Разработана антиподно-равномерная сетка расположения данных и приведены дискретные ортогональные свойства, способ быстрого составления и решения нормальных уравнений.

В результате была построена комбинированная модель гравитационного поля Земли LP-04C(360/720). Сравнение модели с входными аномалиями силы тяжести DTU10 и независимой информации с полигона Нью-Мехико, где выполнялось GNSS-нивелирование подтвердило целесообразность и эффективность предложенной методики.

Ключевые слова: комбинированная модель гравитационного поля Земли, спутниковая градиентометрия GOCE, аномалия силы тяжести, антиподно-равномерная сетка, ортогональные свойства, большие входные массивы данных.

ABSTRACT

Lukianchenko Yu. O. The application of satellite and ground data for construction of Earth's gravitational field models. – On the rights of man.

The Thesis for obtaining the Ph. D. degree in technical sciences in speciality 05.24.01 – geodesy, photogrammetry and cartography. – Lviv Politechnic National University under the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv 2015.

The goal of the dissertation researches is the construction of the new algorithm of efficient using of a large number of heterogeneous information in order to construct models of Earth's gravitational field. The up-to-date information of the satellite gradiometry GOCE was used in this work. Was offered an algorithm to reducing the primary gravity gradients on a spherical surface. An antipode-uniform grid of location of the data was designed and discrete orthogonal properties were provided. This grid and its properties were compared with the classical variant. As a result the individual cases of the location of the data and compliance of the orthogonal properties to them were generalized.

A way of quickly generating and solving of normal equations matrix was developed by the author, in order to reduce the computation time and computer resources. Normal equations matrix become very sparse due to the orthogonal properties developed by the author. The consequence of this is that it can be divided into many smaller matrices. Thus inversion of one large matrix was replaced by the inversion of much smaller dimension matrices. To handle different types of data, was offered a procedure "Remove-Restore". Low and medium frequency were determined on the basis of GOCE vertical gravitational gradients at an altitude of 250 km. Then

we used gravity anomalies DTU10 to determine the high-frequency component and refinement of medium and low frequencies. This approach has been chosen because the high-frequency component is smoothed with increasing of altitude, while the midium frequency and low-frequency components do not vary significantly at an altitude of 250 km. It is importantly, GOCE gradiometry has not improved the high-frequency component of the gravitational field, but it provided measurements which covered the globe (except the polar gaps), which could not be done using ground methods (in inaccessible locations). Moreover, the algorithm is stable when calculate high order of harmonic coeficients, so it is not required to apply the method of regularization which is required for most algorithms of harmonic coefficients determination.

As a result a combined model of the Earth's gravitational field LP-04C (360/720) was built. It based on vertical gravity gradients and gravity anomalies. The studies highlighted the importance of average of data points to build global models. Was built a set of gravity anomalies and approximate quasigeoid heights in order to verify the developed algorithm of constructing of combined model of the gravitational field of the Earth. The expediency and effectiveness of the proposed method of construction of combined model of gravitational field of the Earth was confirmed by the comparison of these data with the input gravity anomalies DTU10 and independent information from the landfill in New Mexico, where was performed GNSS-leveling. So, in terms of practice, this work is a reliable tool for determining the harmonic coefficients for a large number of heterogeneous data and the proposed algorithm can be used to build other models of the gravitational field of the Earth, that can be used to refine the surface of Ukraine quasigeoid.

Keywords: combined model of Earth's gravitational field, satellite gradiometry GOCE, gravity anomaly, antipodean-uniform grid, orthogonal properties, large amounts of input data.