

УДК 523.4

СУЧАСНИЙ СТАН ВИВЧЕННЯ ГРАВІТАЦІЙНОГО ПОЛЯ ТА ТОПОГРАФІЇ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЇ ГРУПИ

А. Церклевич

Національний університет “Львівська політехніка”

Вступ

Найголовніше завдання планетних досліджень – розроблення наукової теорії утворення і еволюції тіл Сонячної системи, в основу якої будуть покладені теоретичні знання з фактичними геодезичними, геофізичними, геологічними, геохімічними і космогеохімічними даними. Отже, виникає нагальна потреба в узагальненні у межах порівняльної планетології накопиченого багажу знань та інформації. Планетологія як наука має дві мети. Перша – вивчення і глибоке розуміння еволюції Сонячної системи з її закономірностями і прогнозуванням майбутнього розвитку. Друга – порівняльний аналіз і дослідження відмінних та схожих рис будови планет, що сприяє кращому розумінню еволюції нашої планети.

Джерелом оновленої інформації про планети земної групи стали результати успішної реалізації космічних програм, внаслідок чого були отримані достатньо репрезентативні моделі їх гравітаційних полів та топографічних поверхонь. Отже, можна порівняти планетологію, яка опирається на дистанційне вивчення гравітаційного поля і топографії планет в багатьох аспектах із ситуацією, яка існувала на початку ХХ ст. у геофізиці Землі[1].

Методи аналітично-числового представлення і нові супутникові проекти вивчення гравітаційного поля планети

Гравітаційне поле планети може бути охарактеризоване різними фізичними величинами: потенціалом притягання, складовими прискорення сили ваги у напрямках координатних осей, градієнтами цих прискорень, відхиленням виска тощо. Останнім часом як характеристику гравітаційного поля планет земної групи, окрім Землі, використовують променеве прискорення, тобто складову прискорення сили ваги за напрямом прямої, що проходить через штучний супутник і станцію спостереження на Землі. При описі гравітаційного поля найчастіше застосовується розклад потенціалу притягання в ряд за кульовими функціями. Поширення набули методи представлення потенціалу притягання у вигляді потенціалу сукупності точкових мас і гравітаційних дисків. При описі гравітаційного потенціалу використовуються також Максвеллове (мультипольне) представлення, функції Ламе, поліноми Чебишова–Лагера, вибіркові функції, простий шар, локальні апроксимації за методом кінцевих елементів та інші методи апроксимацій [2].

Потреба у все точнішому визначенні гравітаційного поля Землі та планет привела до розроблення і впровадження трьох нових методів та технологій вимірювань поля сили ваги за допомогою супутників[3]. Деякі проекти уже успішно реалізуються для Землі, а методи супутникової градієнтометрії у недалекому майбутньому передбачається застосувати для дослідження гравітаційного поля Землі, Місяця і Марса. Коротко охарактеризуємо ці методи:

- система “супутник–супутник”, коли один із супутників знаходиться на високій орбіті, а другий на низькій, реалізований в проекті CHAMP;
- система “супутник–супутник”, коли два супутника знаходяться на низькій орбіті, реалізований в проекті GRACE;
- супутникова градієнтометрія – буде реалізована в проекті GOCE.

У результаті здійснення програм досліджень за цими проектами передбачається вивчити глобальне гравітаційне поле Землі з високою роздільною здатністю, а саме визначити аномалії сили ваги з точністю до 1 мгал, висоти геоїда з точністю до 1–2 см, досягти просторової роздільної здатності на рівні меншому ніж 100 км, виконати ряд інших комплексних геофізичних досліджень. Все це дасть можливість здійснити революційний прорив в наших знаннях про внутрішню будову Землі, краще зрозуміти геодинамічні процеси в океанах і кліматі, їх зміну в часі і просторі.

Гравітаційні і топографічні моделі Землі

Моделі гравітаційного поля Землі створюють за кількома методами та технологіями вимірювань, які передбачають супутникові радіотраекторні спостереження, результати наземних вимірювань сили ваги та дані супутникової альтиметрії океанської поверхні. Донедавна стандартом моделі гравітаційного поля Землі була модель EGM 96 [4]. Останнім досягненням у вивченні гравітаційного поля Землі є модель EGM 2008[5], яка містить гармонічні коефіцієнти до 2159 порядку і є етапним результатом реалізації проекту GRACE. Подальший розвиток можливостей у вказаному напрямі може дати змогу виявляти гравітаційні аномалії антропогенного характеру і відстежувати їх розвиток у масштабі часу, близькому до реального.

На рис. 1 представлені висоти геоїда за моделлю EIGEN-CG03C [6], яка використовує дані, отримані з CHAMP місії і відображає роздільну здатність в 1° дуги (360 порядок сферичних гармонік). Найбільша гравітаційна аномалія корелює з топографією, а висоти геоїда змінюються в межах 200 метрів.

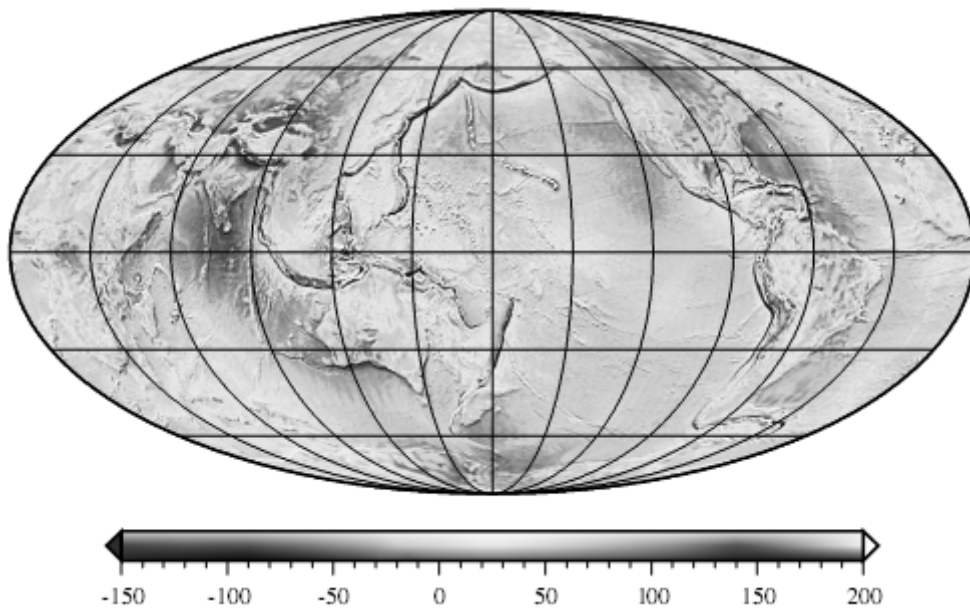


Рис. 1. Висоти геоїда, обчислені з використанням коефіцієнтів до 360 порядку і степеня моделі EIGEN-CG03C відносно референтного еліпсоїда [6]

На рис. 2 зображені порядкові дисперсії коефіцієнтів моделі та їхні помилки. Похибки визначення геоїда та аномалій сили ваги оцінені в межах 30 см та 8 мгал відповідно.

Результати вимірювань топографічної поверхні Землі у планетарному масштабі не такі вражаючі, як результати вивчення гравітаційного поля. Незважаючи на те, що уряди багатьох країн виявляють зацікавленість з наданням фінансової підтримки щодо проведення вимірів земної топографії та батиметрії, а все ж таки велика кількість земної поверхні, особливо океани, залишаються недостатньо вивченими. Насправді, в глобальному масштабі можна констатувати, що топографія Венери та Марса краще вивчена, ніж Землі. Найбільший дефіцит даних все ще залишається за батиметрією океанів.

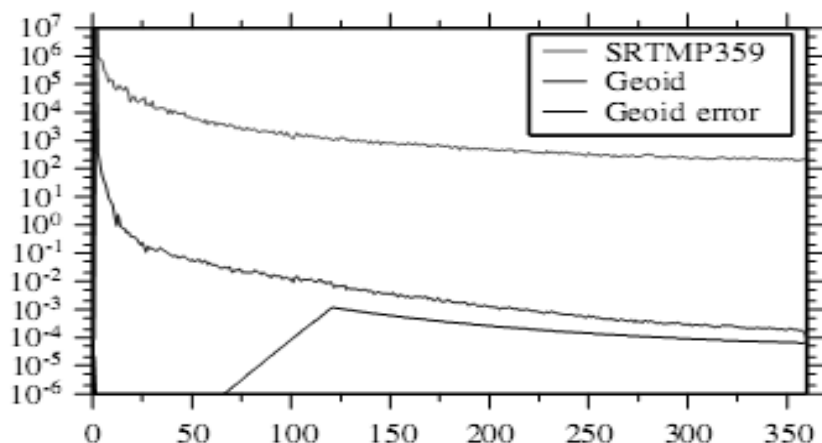


Рис. 2. Порядкові дисперсії коефіцієнтів та їх помилок моделі геопотенціалу (вертикальна шкала-порядкові дисперсії в m^2 , горизонтальна – порядок коефіцієнтів в розкладі геопотенціалу) [6]

Топографічні моделі земної поверхні були побудовані за різними джерелами інформації, зібраної за кілька минулих десятиліть, враховуючи ETOPO5 та ETOPO2 (на 5- та 2-хвилинній гріді, Центром Національних Геофізичних даних), GLOBE (на 30-хвилинній гріді) та GTOPO 30[7]. На рис. 3 представлена мозаїчна картина топографічних висот і глибин Землі.

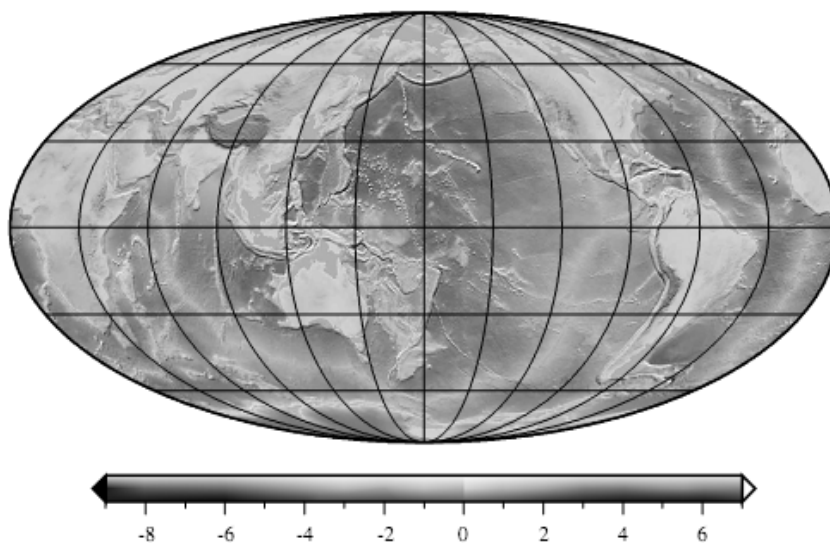


Рис. 3. Топографічні висоти і глибини Землі відносно середнього рівня моря за моделлю SRTM30 PLUS [6]

Гравітаційні і топографічні моделі Марса

Основні результати вивчення гравітаційного поля Марса були опубліковані в період з 1972 р. по 2001р. Огляд опублікованих робіт з побудови моделей ареопотенціала за даними радіотраєкторних спостережень КА “Mariner 9” та “Viking -1 і 2” наведений в [2]. Моделі ареопотенціала відрізняються між собою за точністю отриманих гармонічних коефіцієнтів та детальністю представлення гравітаційного поля Марса, оскільки при їх побудові використовувалась інформація радіотраєкторних вимірів КА, які мали різні параметри орбіти, а також різні методи опрацювання даних. Найкращий результат у визначенні гравітаційного поля Марса за даними радіотраєкторних спостережень КА “Mariner 9” та

”Viking -1 і 2” представляє модель ареопотенціала [8], яка містить гармонічні коефіцієнти до 18 порядку і степені. Однак найбільших досягнень у вивченні гравітаційного поля Марса вдалось отримати лише завдяки місії КА “Mars Global Surveyor” (MGS). У результаті опрацювання даних “MGS” і даних “Mariner 9” та ” Viking-1,2” були побудовані моделі ареопотенціала MGS75D, GMM-2B, MGS85H2, які відповідно містять гармонічні коефіцієнти до 75,80 і 85 порядку і степені [9–11]. У моделі MGS75D найбільш надійно визначені коефіцієнти до 60 порядку і степеня, і автори моделі пропонують їх використовувати для геофізичної інтерпретації аномального гравітаційного поля Марса.

Максимальні значення аномалій сили ваги на один порядок вище (3000 мгал) ніж на Землі. Ареоїд (див. рис. 4) демонструє дуже виразне розділення на східну і західну півкулі з інтервалом від -800 м до +2000 м, знову ж таки на порядок більше ніж на Землі.

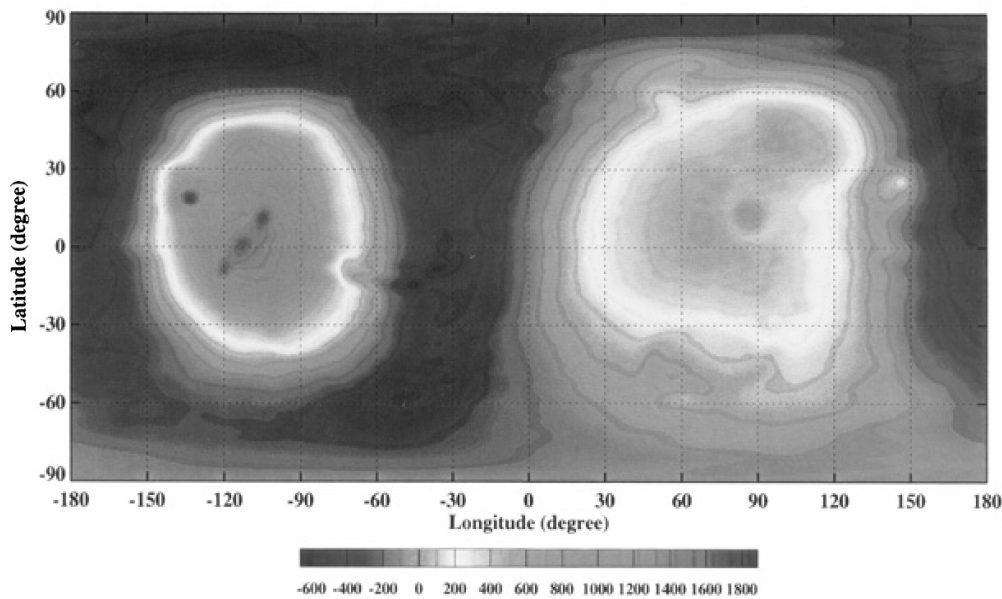


Рис. 4. Висоти ареоїда обчислені з використанням коефіцієнтів до 60 порядку і степеня і моделі MGS75D відносно референтного еліпсоїда з екваторіальним радіусом – 3397км, полярним стисненням – 1/196,9 [10]

Згідно з [11] емпіричний порядковий спектр дисперсій гравітаційного поля Марса має вигляд:

$$\sigma_n = 13 \cdot 10^{-5} / n^2, \quad (1)$$

де σ_n апроксимує середні квадратичні значення С.К.З. сферичних гармонік

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{2n+1} \sum_{m=0}^n (C_{nm}^2 + S_{nm}^2)}. \quad (2)$$

На рис. 5 показані порядкові (С.К.З.) коефіцієнтів моделі гравітаційного поля MGS85H2 та емпіричні криві порядкових σ_n , які були обчислені Каулою[21] та Шмітом та ін.[11].

Топографічна модель Марса побудована з використанням даних лазерного альтиметра (Mars Orbiter Laser Altimeter – MOLA) з точністю приблизно 13 м і детальністю, яка відповідає розкладу висот рельєфу за сферичними функціями до 60 порядку і степеня (178 км). Топографічна карта вказує на південно-північну дихотомію з ухилом з півдня на північ [12](див. рис. 6).

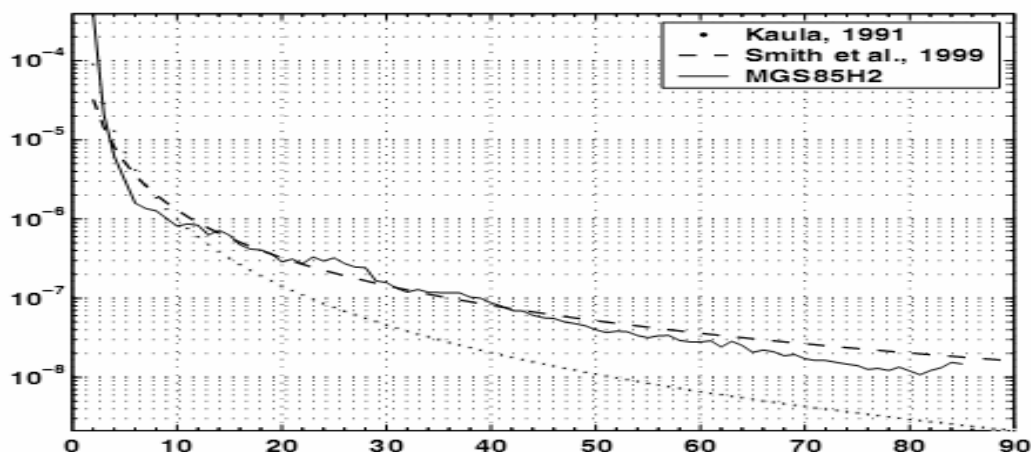


Рис. 5. Зміна середніх квадратичних значень (С.К.З.) сферичних гармонік σ_n для моделі гравітаційного поля MGS85H2 залежно від порядку гармонік n та емпіричні криві гравітаційного потенціалу Марса за даними Каулі і Шміта (вертикальна шкала – С.К.З., горизонтальна – порядок коефіцієнтів)

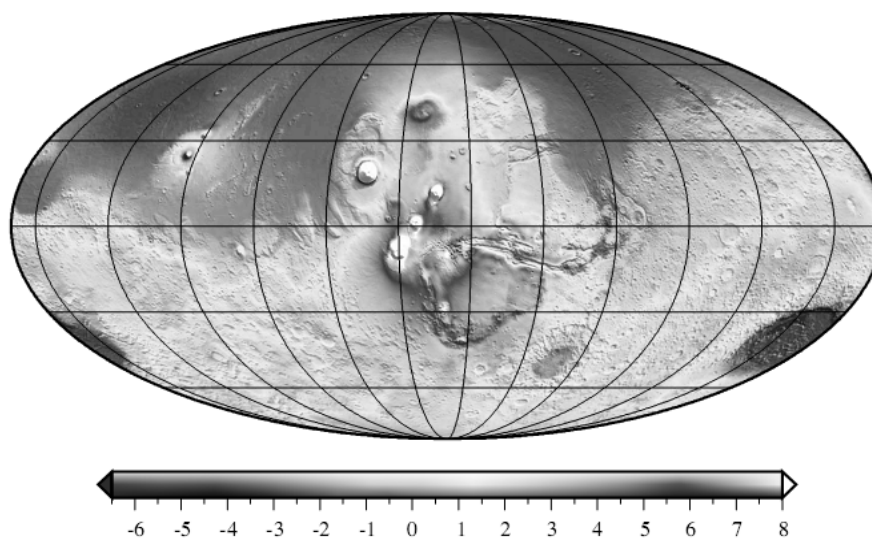


Рис. 6. Глобальна топографія Марса (модель Mars2000 з коефіцієнтами розкладу висот до 90-го порядку) [6]

Гравітаційні і топографічні моделі Венери

Модель гравітаційного поля Венери побудована за результатами аналізу доплеровських даних “Venera”, “Pioneer Venus Orbiter” і даних спостереження “Magellan”. Максимальна роздільна здатність у представленні гравітаційного поля Венери сягає 180 порядку та степеня [13].

На рис. 7 наведені порядкові С.К.З. гармонічних коефіцієнтів моделі гравітаційного поля Венери та емпіричні С.К.З., розраховані за законом Каулі [21] та залежності (3) [13]

$$\sigma_n = 1,8 \cdot 10^{-5} / n^{2,3}. \quad (3)$$

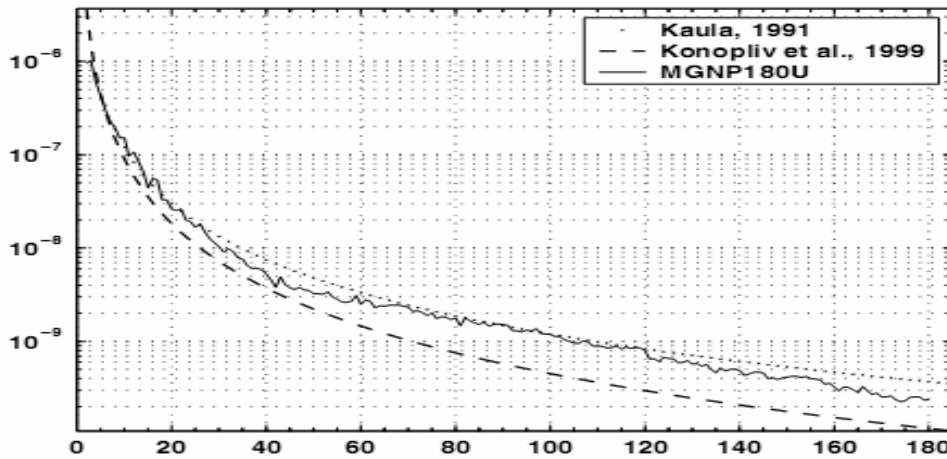


Рис. 7. Зміна середніх квадратичних значень сферичних гармонік σ_n для моделі гравітаційного поля MGNP180U залежно від порядку гармонік n та емпірична крива гравітаційного потенціалу Венери згідно з законом Каулі та Конопліва та ін. [13]

Висоти геоїда Венери показані на рис. 8.

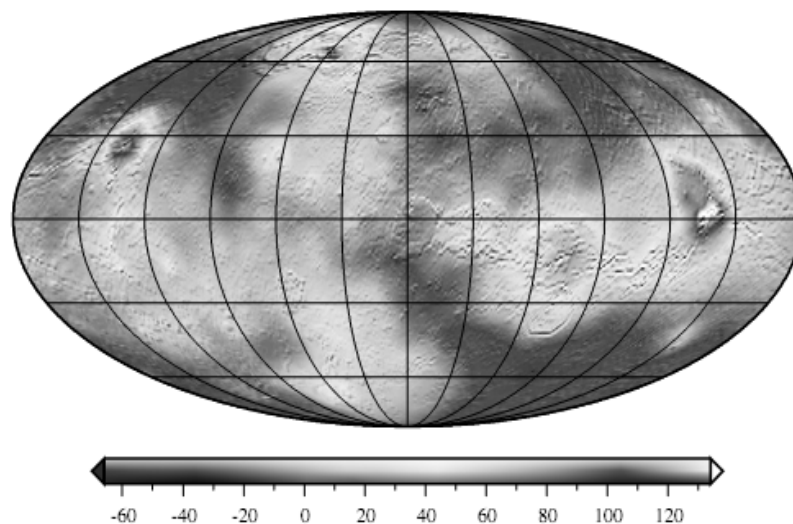


Рис. 8. Висоти геоїда Венери, обчислені з використанням коефіцієнтів моделі MGNP 180U відносно референтної сфери радіусом 6051 км [6]

Інформація про топографічні висоти Венери були отримані в результаті опрацювання альтиметричних даних з КА “Magellan”. На основі отриманих даних про висоти рельєфу планети була побудована модель топографічної поверхні, яка містила гармонічні коефіцієнти до 360 порядку і степеня [14]. На рис. 9 представлена мозаїчна карта зміни висот поверхні Венери.

Гравітаційні і топографічні моделі Місяця

Вивчення гравітаційного поля Місяця ґрунтувалося на результатах спостережень за траєкторіями ШСМ “Луна”, “Lunar Orbiter”, “Apollo”, “Clementina”, “Lunar Prospector”. У периапсісі орбітальна висота Lunar Prospector становила 25 км. Починаючи з середини 60-х років було запропоновано більше двох десятків різних моделей, які узгоджувались для малих порядків гармонічних коефіцієнтів і відрізнялись значеннями коефіцієнтів високих порядків [23]. Основним недоліком всіх існуючих гравітаційних моделей є брак прямих даних спостережень з оберненої невидимої сторони Місяця. Отже, ранні моделі гравітаційного поля не зовсім надійно описували

невидиму із Землі сторону Місяця. Однак завдяки складному підходу, заснованому на аналізі прискорень гравітаційних збурень у перичентрі орбіт ШСМ акумульованих в кінці затемнення Місяцем ефект браку даних з оберненої сторони в останніх моделях певним чином був зменшений [15]. Методи представлення і результати моделювання гравітаційного поля Місяця наведено в [23]. Останні досягнення у вивченні гравітаційного поля Місяця опираються на моделі селенопотенціалу:

- Lunar Prospector Models (LP75n, LP100n, LP165P)[15,16] ;
- Goddard Lunar Gravity Model 1 та 2 (GLGM 1, 2)[17].

Модель LP165P включає гармонічні коефіцієнти до 165 порядку і степеня [16]. Однак автори моделі вважають, що надійно можна визначити аномалії сили ваги Місяця за моделлю LP165P до 110-го порядку та степеня (для видимої сторони) та до 60-го порядку та степеня (для невидимої сторони).

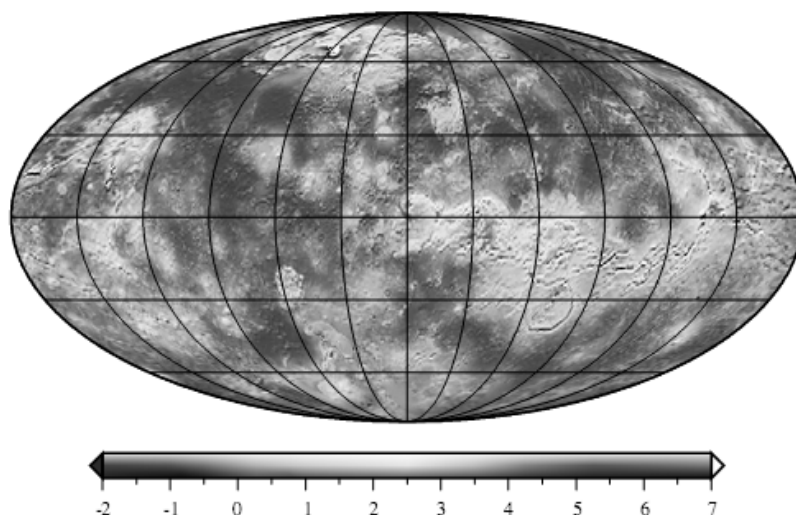


Рис. 9. Топографічні висоти Венери відносно середнього рівня за моделлю GTDR 3.2 [6]

На рис. 10 показана зміна С.К.З. сферичних гармонік σ_n для моделі LP165P гравітаційного поля залежно від порядку гармонік n (до 165-го порядку), а також емпіричний закон зміни С.К.З. встановлений для гравітаційного потенціалу Місяця [15]. Емпірична порядкова закономірність С.К.З. , виведена для гравітаційного потенціалу Місяця [15], є такою

$$\sigma_n = 1,2 \cdot 10^{-4} / n^{1,8}. \quad (4)$$

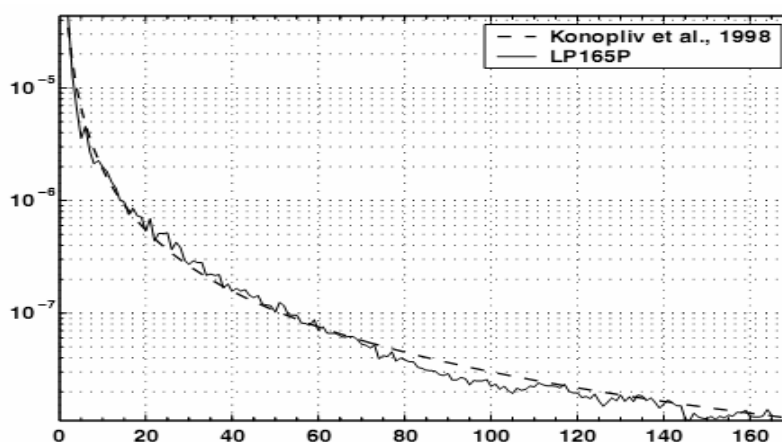


Рис. 10. Зміна середніх квадратичних значень сферичних гармонік σ_n для моделі гравітаційного поля LP165P залежно від порядку гармонік n та емпірична крива гравітаційного потенціалу Місяця [15]

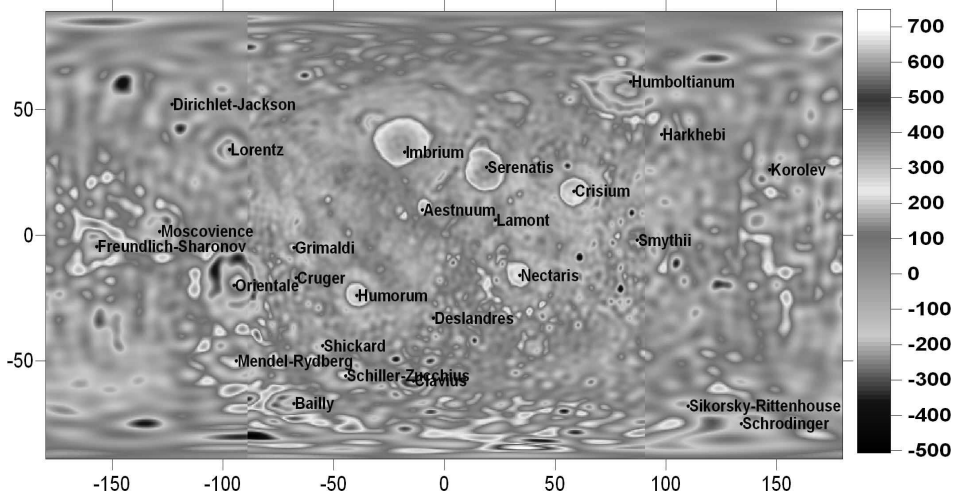


Рис. 11. Аномалії сили ваги Місяця, обчислені за моделлю селенопотенціалу LP165p1 до 110-го порядку та степеня (для видимої сторони) та до 60-го порядку та степеня (для зворотного боку). Аномалії сили ваги наведені у мгаллах [15]

Великі позитивні гравітаційні аномалії асоціюються з концентраціями маси в басейнах морів видимої сторони, так званими масконами (рис. 11).

Топографічна модель Місяця була побудована на основі даних лазерного альтиметра “Clementina” представлена гармонічними коефіцієнтами до 90 порядку та степеня. Ця модель є найгіршою за точністю і роздільною здатністю порівняно з топографічними моделями Землі, Венери і Марса [24]. Зауважимо також, що роздільна здатність гравітаційного поля на світлій стороні перевищує роздільну здатність топографічної моделі.

Інтерпретація та висновки

Проблеми, пов’язані з інтерпретацією гравітаційних полів планет, є доволі складними, і тільки зіставленням цих полів з іншими даними планетарного характеру можна встановити геофізичний сенс розподілу мас, які відповідають за планетарні аномалії гравітаційного поля. Важливу роль у розумінні структури гравітаційного поля планети відіграє її топографія, оскільки насамперед розглядається питання її ізостатичної рівноваги.

Загальновідомо, що для Землі ізостатична рівновага добре здійснюється лише в регіональному масштабі. Умова виконання ізостатичної рівноваги в загальному випадку вимагає рівності нулю значень ізостатичних аномалій. Хоча для Землі зональні аномалії сили тяжіння невеликі (порядка 20–40 мГал) [24, 25], відмінність їх від нуля ставить питання про їх походження. Враховуючи планетарний характер аномалій, можна допустити, що вони пов’язані або з аномальними масами, розташованими достатньо глибоко в мантії планети, або з інтегральним ефектом аномальних неоднородностей в корі і верхній мантії.

Сьогодні більшість дослідників [24, 26] вважають, що негідростатичні низькочастотні гармоніки гравітаційного поля Землі не є результатом сумісного ефекту топографії та її ізостатичної компенсації і, отже, вони пов’язані з неоднорідностями густини мантійних горизонтів планети.

На відміну від Землі, для Марса характерна значна кореляція між гравітацією і топографією для нижніх порядків сферичних гармонік [2]. тоді як діючі геодинамічні процеси, що належать до конвекції мантії, субдукції і післяльодовикового сповзання в основному визначають нижні гармоніки земного геоїда. Топографічні особливості Марса, що належать до вулканічної активності в минулому – такі, як Tharsis complex (Olympus Mons) – визначають переважно нижні гармоніки ареоїда. Дослідження ізостатичного стану топографії Марса [2, 24] показали, що на планеті існують великі за площею регіони, для яких спостерігаються значні відхилення від ізостазії.

Фундаментальним питанням для Марса є формування північних низовин. Зібер та ін. [12] за результатами визначення гравітаційного поля та топографії вважали гіпотезу зіткнень малоімовірною. Всупереч цьому, вулканічне або осадове заповнення вважається більш ймовірним, оскільки негативні гравітаційні лінійні аномалії разом з геометричними характеристиками та властивостями потоків цих структур вказують на поверхневі підлітосферні або глибинні мантийні потоки.

Порівняння порядкових дисперсій для планет показує, що гравітаційне поле і топографія Марса помітно нерегулярніші ніж для Землі і Місяця. Проте для порядкових кореляцій виконуються інші співвідношення. Так, для Землі виявляється, що між сферичними гармоніками в розкладі аномалій сили ваги і топографії для низьких гармонік відсутня закономірна лінійна залежність, тоді як для Місяця і Марса спостерігається в основному тісна кореляційна залежність для тих самих порядків сферичних гармонік. Ця обставина, як правило, пояснюється скомпенсованістю основних регіональних неоднорідностей рельєфу для Землі на невеликих глибинах ($d=30$ км.), а для Місяця, Венери і Марса – на глибинах, що значно перевищують прийнятну нормальну товщину кори.

Отже, можна зробити висновок, що ізостатична компенсація глобальних топографічних структур Місяця, Венери і Марса, на відміну від Землі, здійснюється на достатньо великих глибинах – у мантиї планет. Отже, для Землі в планетарному масштабі існує компенсація довгохвильових форм рельєфу, тоді як для Місяця, Венери і Марса довгохвильові форми рельєфу не компенсуються, отже, можна допустити, що для цих планет в класичному розумінні ізостазія не підтверджується. Таке припущення вимагає збереження протягом геологічно довгих періодів часу великих надгідростатичних напружень у корі планети, що можливо тільки за рахунок існування потужної і міцної літосфери до 500км або збільшення в'язкості верхньої мантиї [29].

Альтернативна інтерпретація планетарних аномалій гравітаційного поля Місяця і Марса передбачає наявність великомасштабних глибинних латеральних неоднорідностей, що простежуються до ядра і в процесі еволюції були динамічно зв'язані з геологічними структурами планети, які сформували їх геометричну фігуру [2]. Підтвердженням тому може бути якоюсь мірою описана в [27] інтерпретація гравітаційного поля Марса. Зауважимо також, що для Землі сейсмографія фіксує надзвичайно важливий для тектоніки і геодинаміки феномен: дослідження тихоокеанської неоднорідності аж до ядра планети [28]. Отже, можна припустити, що під час акреції планет гомогенізація не відбулася. Тому правомірно говорити про первинну тектонічну і геодинамічну неоднорідність Марса, яка відобразилась на сучасному образі планети.

Ключовим питанням, яке виникає на основі існуючих дистанційних радарних зображень і побудованих гравітаційних та топографічних моделей, є тип термальної еволюції на Венері [22]. Постає питання, чи існує сильна конвекція мантиї, що пов'язана з тонкою літосферою і чи потік тепла такого ж порядку, що й на Землі, або чи існує товста літосфера із слабким потоком тепла? Шуберт та ін. [18] аналізує сильну позитивну кореляцію рівневої і топографічної поверхонь на довгих довжинах хвилі. Це призводить до компенсаційних глибин порядку 200–300 км, тоді як ймовірна товщина літосфери менша за 40 км. Вочевидь, переконливішою інтерпретацією є динамічна компенсація конвекції мантиї. Кіфер і Потер [22] аналізують гравітаційні аномалії декількох великих щитових вулканів. Вони використовують суперпозицію декількох асиметричних навантажень, розрахованих за методом найменших квадратів з використанням топографічних даних. У результаті еластична товщина літосфери за їх висновками сягає 10–22 км. Ці оцінки також сильно залежать від літосферних термальних градієнтів. Отже, їхні висновки також підтверджують гіпотезу тонкої літосфери Венери.

Результати досліджень гравітаційного поля і топографії Місяця приводять до висновку про те, що в планетарному масштабі її топографія, за винятком величезних циркових басейнів (морські ділянки), ізостатично компенсуються [23, 24]. Для Місяця аномалії густини зосереджені у приповерхневих горизонтах, корелюють з масконами і ймовірно підтримуються кінцевою міцністю літосфери. Більшість дослідників [23, 24, 30] вважають, що для Місяця маскони ізостатично не врівноважені і їх інтерпретація передбачає або значну твердість зовнішньої оболонки Місяця, яка

здатна доволі довго витримувати напруження, або значну в'язкість матеріалу, що приводить до того, що час, який пройшов з моменту утворення масконів, недостатньо для їх ізостатичного врівноваження. Ще однією цікавою великомасштабною особливістю гравітаційного поля Місяця є пік амплітуди гравітаційного спектра 2-го порядку, що обумовлений аномально великими значеннями гармонік C_{20}, C_{22} , на які ймовірно вплинули неоднорідності мас розміщені в екваторіальній області на значній глибині. Якщо побудовані моделі тривимірного розподілу густини Місяця адекватно відображають реальну картину його внутрішньої будови, то можна також стверджувати про геодинамічну еліптичну неоднорідність, яка виникла на ранніх етапах еволюції. Залишається загадкою, внаслідок яких еволюційних процесів така неоднорідність виникла на Місяці.

Подальше вивчення гравіметричної структури і реологічних властивостей надр планет дасть змогу на основі сумісного аналізу перейти до кількісної інтерпретації особливостей їх гравітаційних полів і топографії. Однак сьогодні інформаційне забезпечення науки про планети засноване лише на даних про поверхню планети та її атмосферу. Геофізичні зондування (сейсмічні, електромагнітні) планетних надр додадуть третє вимірювання. Як кульмінація досліджень Місяця та Марса за допомогою автоматів, експедицій за участю людини, проведення експериментів з активною і пасивною сейсмікою, буріння і вимірювання теплового потоку, дасть змогу створити моделі внутрішньої будови планет, які були би адекватними до реальності.

Література

1. Жарков В.Н. От физики Земли к сравнительной планетологии // Природа. – 1998. – № 12. – С.86–97.
2. Мещеряков Г.А., Церклевич А.Л. Гравитационное поле, фигура и внутреннее строение Марса. – К.: Наукова думка, 1987. – 240 с.
3. Гофман-Велленгоф Б., Мориц Г. Физическая геодезия / Под ред. Ю.М.Неймана. – М.: Изд-во МИИГАиК, 2007. – 426 с.
4. <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/egm96.html>
5. http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/first_release.html
6. Wieczorek M. A. The gravity and topography of the terrestrial planets // Treatise on Geophysics. – 2007. – 10, №5. – P.165–206.
7. National Geophysical Data Center, ETOPO2 global 2# elevations [CD-ROM], U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Boulder, Colorado, USA, -2001.
8. Balmino G., Moynot B., Vales N. Gravity field model of Mars in spherical harmonics up to degree and order eighteen // J. Geophys. Res. – 1982. – v.87, № 1. – P.9735–9746.
9. Lemoine, F. G. Smith, D. E. Rowlands, D. D. Zuber, M. T. Neumann, G. A. Chinn, D. S. And Pavlis, D. E. An improved solution of the gravity field of Mars (GMM-2B) from Mars Global Surveyor // J. Geophys. Res. – 2001. – v.106(E10). – P.23359–23376.
10. Yuan D.-N., Sjogren W.L., Konopliv A.S., Kucinskas A. B. Gravity field of Mars: 75th Degree and Order Model // J. Geophys. Res. – 2001. – v.106, № E10. – P.23,377–23,401.
11. Smith, D.E. Sjogren, W.L. Tyler, G.L. Balmino, G. Lemoine, F.G. and Konopliv, A.S. The Gravity Field of Mars: Results from Mars Global Surveyor // Science. – 1999. – 286. – P. 94–97.
12. Zuber M.T., Solomon S.C., Phillips R.J., Smith D.E., Tyler G.L., Aharonson, O. Balmino, G. Banerdt, W.B. Head, J.W. Johnson, C.L. Lemoine, F.G. McGovern, P.J. Neumann, G.A. Rowlands, D.D. and Zhong, S. Internal Structure and Early Thermal Evolution of Mars from Mars Global Surveyor Topography and Gravity // Science. – 2000. – 287. – P.1788–1793.
13. Konopliv A.S., W.B. Banerdt and W.L. Sjogren, Venus Gravity: 180th degree and order model // Icarus. – 1999. – 139. – P.3–18.
14. Rappaport N.J., A.S. Konopliv, A.B. Kucinskas and P.G. Ford 1999. An improved 360 degree and order model of Venus topography // Icarus. – 1999. – 139(1). – P.19–31.
15. Konopliv A.S., Binder A.B., Hood L.L., Kucinskas A.B., Sjogren W.L. and Williams J.G. Improved gravity field of the Moon from lunar prospector // Science. – 1998. – 281. – P.1476–1480.

16. Konopliv A.S., S.W. Asmar and D.N. Yuan, Recent gravity models as a result of the Lunar Prospector mission // *Icarus*. – 2001. – 150. – P.1–18.
17. Lemoine F.G., Smith D.E., Zuber M.T., G.A. Neumann, D.D. Rowlands. A 70th degree lunar gravity model (GLGM-2) from Clementine and other tracking data // *J. Geophys. Res –Planets*. – 1997. – 102(E7). – P.16339–16359 .
18. Schubert G., Turcotte D.L. and Olson P. *Mantle Convection in the Earth and Planets*. – Cambridge University Press, 2001. – 940 p.
19. Rummel R. Gravity and topography of Moon and planets // *Earth, Moon, and Planets* .-2005.-94. – P.103–111.
20. Schubert, G., W.B. Moore and D.T. Sandwell, Gravity over coronae and chasmata on Venus // *Icarus*. – 1994. – 112. – P. 130–146.
21. Kaula W.M. in: O.L. Colombo (ed.), *From Mars to Greenland: Charting Gravity with Space and Airborne Instruments*, IAG Symposia 110. Springer, New-York. – 1991. – P.11–10.
22. Kiefer W.S. and Potter E-K. Gravity anomalies at Venus shield volcanoes: Implications for lithospheric thickness (abstr.) // *Lunar Planet. Sci. XXXI*. – 2000. – P.1924.
23. Сагітов М.У. Лунная гравиметрия. – М.: Наука, 1979. – 432 с.
24. Watts A.B. *Isostasy and Flexure of the Lithosphere*. – Cambridge University Press, 2001. – 458 p.
25. Артемьев М., Изостазия Е. В кн.: *Гравитационная модель коры и верхней мантии Земли*. – К.: Наукова думка, 1979. – С.28–32.
26. Тараканов Ю.А., Черевко Т.И. Интерпретация крупнейших гравитационных аномалий Земли // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. – 1979. – № 4. – С.25–42.
27. Церклевич А.Л., Заєць О.С.Інтерпретація планетарних аномалій гравітаційного поля Марса // *Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК “Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва”*. – Львів: Нац. ун-т “Львівська політехніка”. – 2008. – С.35–44.
28. Пушаровський Ю.М. Сейсмографія, тектоника и глубинная геодинаміка // *Вестник ОГГГГН РАН*. – 1997. – № 2.
29. Церклевич А.Л., Евсеева Э.М. О взаимосвязи аномального гравитационного поля и топографии планеты (Земля, Марс, Луна) // *Геодезия, картография и аэрофотосъемка*. –1981. – 33. – С.85–94.
30. Phillips R.J., Lambeck K. Gravity fields of the terrestrial planets:Long-wavelength anomalies and tectonics // *Rev. Geophys.* – 1980. – 18, № 1. – P. 27–76.

Сучасний стан вивчення гравітаційного поля та топографії планет земної групи

А. Церклевич

Дається короткий огляд результатів моделювання гравітаційного поля і топографії Землі, Венери, Марса і Місяця. Отримані результати інтерпретовано у межах порівняльної планетології.

Современное состояние изучения гравитационного поля и топографии планет земной группы

А. Церклевич

Дается краткий обзор результатов моделирования гравитационного поля и топографии Земли, Венеры, Марса и Луны. Полученные результаты интерпретированы в рамках сравнительной планетологии.

The current knowledge of the gravity and topography of the terrestrial planets

A. Tserklevych

This article presents brief overview of the results from the modeling of the gravity and topography of the Earth, Venus, Mars, and the Moon. And interprets the received results in the framework of the comparative planetology.