

ГРАВІТАЦІЙНІ МОДЕЛІ ТРИВИМІРНОГО РОЗПОДІЛУ ГУСТИНИ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЇ ГРУПИ

Розглянуто інтерпретацію планетарних аномалій гравітаційного поля Землі, Венери, Марса і Місяця у взаємозв'язку з внутрішньою неоднорідною будовою цих планет. Вихідною інформацією для досліджень були моделі гравітаційного поля перелічених планет до 20-го порядку і степеня, а також параметри тришарової моделі (кора, мантія, ядро) кожної з цих планет та відповідні планетарні параметри.

Ключові слова: гравітаційна модель розподілу густини; степеневі моменти густини; гармонічні коефіцієнти розкладу гравітаційного поля; аномалії сили тяжіння; обернена гравіметрична задача.

Вступ

Проблеми вивчення внутрішньої будови планет належать до фундаментальних у пізнанні утворення та еволюції тіл Сонячної системи. До їх розв'язання підходять комплексно, комбінуючи дані, отримані як експериментальними, так і теоретичними методами в різних областях знань: астрономії, космогонії, космохімії, планетодезії, планетології, планетарній фізиці. Методи вивчення внутрішньої будови планет земної групи в основному залишаються такими самими, як і для Землі, однак мають певні особливості. В дослідженні будови Землі важливу роль, як прямий метод визначення загальної внутрішньої структури планети, відіграє сейсмологія. Для Марса і Венери сейсмічні дані взагалі відсутні і тому, щоб отримати уявлення про їх внутрішню будову, використовують хімічні моделі, які приймають за базові для подальших досліджень. Однак параметри гравітаційного поля, визначені для всіх планет земної групи, надають неоціненну інформацію, за допомогою якої можна в певному наближенні робити висновки про їх неоднорідну будову. Найважливішою фізичною характеристикою неоднорідності надр планети є густина, яка генерує гравітаційне поле і суттєво впливає на інші геофізичні поля. Гравітаційні моделі розподілу густини планет в ідеалі повинні пояснювати всі особливості гравітаційного поля, представленого повним набором коефіцієнтів C_{nm} і S_{nm} зовнішнього потенціалу планети. Тому всілякі спроби активізувати дослідження в цьому напрямі заслуговують на увагу. З іншого боку, щодо таких планет, як Венера, Марс, Місяць, в останньому двадцятиріччі отримано нові результати вивчення їх гравітаційних полів, тому ця інформація потребує осмислення і порівняльного аналізу даних щодо внутрішньої будови планет.

Метою роботи є дослідження проблеми вивчення неоднорідного розподілу густини надр планет земної групи на основі даних про параметри їх гравітаційного поля з позицій порівняльного аналізу їх неоднорідної будови.

Постановка проблеми

Як відомо, метод сейсмічної томографії є найадекватнішим інформативним джерелом даних про неоднорідну будову Землі. Для інших планет земної групи такої інформації ще немає. Обробка

супутникових орбітальних даних дозволила закартографувати аномалії сили тяжіння, які пов'язані з неоднорідною будовою планет. Параметри гравітаційного поля відображають інтегральний ефект всіх мас, що утворюють планету. А отже, дані про гравітаційний потенціал є ключовими для побудови моделі розподілу густини планети, бо кожна така модель повинна бути гравітаційною, тобто її гравітаційний ефект має відповідати спостережуваному гравітаційному полю. У цьому сенсі, мабуть, логічно говорити про започаткування напряму гравітаційної томографії планет, який охоплював би розроблення математичних методів і обчислювальних алгоритмів дослідження їх неоднорідної внутрішньої будови з використанням параметрів гравітаційного поля. І хоча гравіметрична обернена задача належить до некоректних задач (вперше на це звернув увагу акад. М.М. Лаврентьев [Лаврентьев, 1962]), але сейсмічна інверсія для визначення глобальної моделі Землі, такої як PREM (попередня референсна земна модель) з сейсмічної томографії, також належить до обернених геофізичних задач [Мориц, 1994]. Спільним в цих задачах є визначення характеристик неоднорідної внутрішньої структури планети.

Відомо, що розподіл густини внутрішніх мас разом з топологією фігури планети формує її зовнішнє гравітаційне поле. Для чіткішого розуміння постановки задачі введемо поняття моделі розподілу густини, яка узгоджена з параметрами зовнішнього гравітаційного поля, і назовемо її гравітаційною моделлю розподілу густини. За формулюванням К. Картвелішвілі [Картвелішвілі, 1982], під моделлю розподілу густини області G розумітимемо розподіл густини $\delta(P)$, де точка P належить області G ($P \in G$). Гравітаційна модель області G , яка відповідає заданому векторно-функції $U(\bar{P})$, де \bar{P} є точкою деякої області R , це така модель розподілу густини, гравітаційний ефект якої збігається із заданою функцією $U(\bar{P})$: $U(\bar{P}) = A\delta(P)$, A – оператор, який відображає множину $F(\delta \in F)$ на множину $E(U \in E)$. Звідси принциповим є твердження – будь-яка адекватна середовищу модель розподілу густини повинна бути гравітаційною.

Оскільки об'єкт дослідження – внутрішня структура планети – є надзвичайно складним, апроксимаційний підхід до побудови моделей, які відповідали б нинішнім уявленням і узгоджувалися б з даними вимірювань, вважається єдиною можливістю та цілком обґрунтованим, оскільки смислове значення будь-якої апроксимації – це описання складних об'єктів простішими моделями з допустимою точністю.

Параметризація моделі

У межах апроксимаційного підходу розглянемо метод [Мещеряков, 1969], який допускає отримання коректного розв'язку оберненої задачі гравіметрії, якщо задані степеневі моменти густини

$$I_{pqr}(\delta) = \int_{\tau} \delta x^p y^q z^r d\tau, (p+q+r = n), \quad (1)$$

повна сукупність яких дає змогу отримати однозначний розподіл мас планети. Величини I_{pqs} , кількість яких для кожного n дорівнює $(n+1)(n+2)/2$, лінійно зв'язані з $2n+1$ гармонічними коефіцієнтами гравітаційного поля планети співвідношеннями:

$$\left. \begin{matrix} C_{nk} \\ S_{nk} \end{matrix} \right\} = \sum_{p+q+r=0}^N \alpha_{pqr} \beta_{pqr} \left. I_{pqr} \right\}, \text{ або}$$

$$\left. \begin{matrix} C_{nk} \\ S_{nk} \end{matrix} \right\} = \frac{1}{Ma^n} \int_{\tau} \delta \cdot r^n \cdot P_n^k(\cos \theta) \left. \begin{matrix} \cos k\lambda \\ \sin k\lambda \end{matrix} \right\}. \quad (2)$$

Формули (2) дозволяють отримати квадратичне наближення моментів n -го порядку. Проблему степеневих моментів для шуканої густини можна вирішити аналітично або числово. При цьому розподіл густини надр планети може вважатися таким, що належить до класу L_{τ}^2 , тобто інтегрованих з квадратом функцій. Тоді тривимірну модель розподілу густини $\delta(x, y, z)$ надр планети можна подати у вигляді [Мещеряков, Фис, 1981]:

$$\delta(x, y, z) = \delta_0(\rho) + \sum_{p+q+s=0}^N b_{pqs} \cdot W_{pqs}(x, y, z), \quad (3)$$

де $\delta_0(\rho)$ – радіальна модель густини; b_{pqs} – коефіцієнти; $W_{pqs}(x, y, z)$ – система ортогональних поліномів у еліпсоїді τ , для яких справедлива формула Родріга

$$W_{pqs}(x, y, z) = \frac{1}{2^N p!q!s!} \frac{\partial^N}{\partial x^p \partial y^q \partial z^s} \times \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} - 1 \right)^N, \quad (4)$$

де a, b, c – півосі еліпсоїда τ .

Наведені формули дозволяють розрахувати сферично несиметричні моделі розподілу густини надр, якщо задати фундаментальні параметри планети та гармонічні коефіцієнти розкладу гравітаційного поля за кульовими функціями.

Розрахунок тривимірного розподілу густини $\delta(x, y, z)$ надр планети можна виконати за такою схемою обчислень [Мещеряков, Церклевич, 1987, Заяць, 2005]. Спочатку на основі вихідної інформації будується модель другого порядку:

$$\delta_2(x, y, z) = \delta_0(\rho) + \sum_{p+q+s=0}^2 b_{pqs} \cdot W_{pqs}(x, y, z) \quad (5)$$

Коефіцієнти b_{pqs} до другого порядку виразимо через гармонічні коефіцієнти C_{20}, C_{22} і динамічне стиснення f_d :

$$b_{000} = \delta_c \left(1 - \frac{3}{\delta_c} \int_0^1 \delta_0(\rho) d\rho \right), \quad (6)$$

$$b_{100} = b_{010} = b_{001} = b_{110} = b_{101} = b_{011} = 0, \quad (7)$$

$$b_{200} = \frac{7}{2} \delta_c \left(\begin{matrix} 5 \left(-\frac{C_{20}}{2f_d} + 2C_{22} \right) - 3 + \\ + \frac{5}{\delta_c} \int_0^1 \delta_0(\rho) \rho^4 d\rho + \\ + \frac{3}{\delta_c} \int_0^1 \delta_0(\rho) \rho^2 d\rho \end{matrix} \right), \quad (8)$$

$$b_{020} = \frac{7}{2} \delta_c \left(\begin{matrix} 5 \left(-\frac{C_{20}}{2f_d} - 2C_{22} \right) - 3 + \\ + \frac{5}{\delta_c} \int_0^1 \delta_0(\rho) \rho^4 d\rho + \\ + \frac{3}{\delta_c} \int_0^1 \delta_0(\rho) \rho^2 d\rho \end{matrix} \right), \quad (9)$$

$$b_{002} = \frac{7}{2} \delta_c \left(\begin{matrix} 5 \left(1 - \frac{1}{2f_d} \right) C_{20} - 3 + \\ + \frac{5}{\delta_c} \int_0^1 \delta_0(\rho) \rho^4 d\rho + \\ + \frac{3}{\delta_c} \int_0^1 \delta_0(\rho) \rho^2 d\rho \end{matrix} \right), \quad (10)$$

де δ_c – середня густина планети.

Для узгодження тривимірного розподілу густини з гармонічними коефіцієнтами третього порядку скористаємось методом найменших квадратів для їх спільного врівноваження зі степеневими моментами густини I_{pqs}

$$\left. \begin{matrix} C_{3k} \\ S_{3k} \end{matrix} \right\} = \sum_{p+q+s=3} \alpha_{pqs} \beta_{pqs} \left. (I_{pqs} + \Delta I_{pqs}) \right\}, \quad (11)$$

де ΔI_{pqs} – поправки в степеневі моменти густини I_{pqs} , які визначаються за моделлю розподілу густини другого порядку зі співвідношення:

$$I_{pqs} = \int_{\tau} \delta_2(x, y, z) x^p y^q z^s d\tau. \quad (12)$$

Отримавши поправки ΔI_{pqs} , значення коефіцієнтів b_{pqs} обчислимо за формулою:

$$b_{pqs} = \frac{\Delta I_{pqs} \cdot (2n+3)!!}{3n!} \left(\frac{a_e}{a}\right)^p \left(\frac{a_e}{b}\right)^q \left(\frac{a_e}{c}\right)^s. \quad (13)$$

За аналогічним алгоритмом виконують розрахунки для моделей тривимірного розподілу густини вищих порядків.

Використана інформація

Розглянемо описаний метод на прикладі визначення тривимірного розподілу густини $\delta(x, y, z)$ для моделей надр Землі, Венери, Марса та Місяця, які структурно складаються з кори, мантії і ядра. В таблиці наведено вихідні параметри для моделювання тривимірного розподілу густини надр цих планет.

Для побудови моделей тривимірного розподілу густини також будемо використовувати коефіцієнти C_{nk}, S_{nk} розкладу гравітаційного поля Землі [Pavlis

et al., 2008], Венери [Konopliv et al., 1999], Марса [Lemoine et al., 2001] та Місяця [Konopliv et al., 2001] до 20-го порядку і степеня (обмежене використання коефіцієнтів зумовлене глобальним характером моделювання тривимірного розподілу густини надр планет та алгоритмом розв'язування задачі).

Зауважимо, що джерелом оновленої інформації про планети земної групи є результати побудови достатньо репрезентативних моделей їх гравітаційних полів. Це стало можливим завдяки зібраній інформації радіотраекторних спостережень за КА на орбітах навколо планет і проведеними на КА альтиметричними вимірюваннями. Наприклад, істотно покращені результати дослідження гравітаційного поля Місяця отримано завдяки місії КА "Clementine" (1994), гравітаційне поле Венери та Марса з високою роздільною здатністю визначено за результатами опрацювання даних з КА "Magellan" та "Mars Global Surveyor", які перебували на орбіті в 1990 та 1997 рр. відповідно. Дані про гравітаційне поле Землі також було оновлено завдяки нещодавнім місіям спеціальних супутників за проектами CHAMP, GRACE та GOCE.

Вихідні параметри для моделювання тривимірного розподілу густини надр планет

| Параметри планет | Земля | Венера | Марс | Місяць |
|---|-----------|---------------|-----------|----------|
| Планетоцентрична гравітаційна стала f , $\text{км}^3/\text{с}^2$ | 398600,44 | 324858,59 | 42828,37 | 4902,80 |
| Стиснення α | 1:298,257 | 0 | 1: 196,88 | 0 |
| Полярний (середній) момент інерції $C / MR^2, (I / MR^2)$ | (0,3299) | (0,331-0,341) | 0,365 | 0,393 |
| Середня густина δ , $\text{г}/\text{см}^3$ | 5,5143 | 5,2419 | 3,9340 | 3,3464 |
| Середній радіус планети R , км | 6371,0 | 6050,9 | 3389,9 | 1737,6 |
| Ядро радіусом R_j , км | 3486 | 3250 | 1662 | 340 |
| Мантія товщиною H , км | 2840 | 2740 | 1678 | 1338 |
| Кора товщиною h км та середньою густиною δ $\text{г}/\text{см}^3$ | 45/2,7 | 60/2,9 | 50 / 3.0 | 60 / 2.9 |

Результати досліджень та їх інтерпретація

Інтерпретація результатів вивчення гравітаційного поля планет земної групи у взаємозв'язку з їх внутрішньою будовою становить значний інтерес для вивчення їх неоднорідної будови, оскільки прояви неоднорідного розподілу мас для цих планет найбільшою мірою можуть відобразитись на довгохвильових аномаліях сили тяжіння. Однак проблеми, пов'язані з інтерпретацією гравітаційних полів планет, досить складні та неоднозначні, і тільки використовуючи метод аналогій для зіставлення цих полів та враховуючи інші дані планетарного характеру, можна встановити розподіл мас, відповідальних за планетарні аномалії гравітаційного поля. Ключовою проблемою в інтерпретації планетарних аномалій гравітаційних полів є розділення збурювальних впливів кори і мантії. У будь-якій дискусії верхня оболонка з певних причин розглядається як головний збурювальний фактор, що впливає на гравітаційне поле

планети. Підтвердженням цьому можуть бути такі аргументи [Щерклевич та ін., 2010]:

- аномальні маси, які найближче розміщені до поверхні планети, найбільше впливають на її зовнішнє гравітаційне поле;
- неоднорідні маси у верхній оболонці планети корелюють з її рельєфом і тектонічною будовою;
- неоднорідні маси, розміщені в зовнішній сферичній оболонці планети, також здійснюватимуть додатковий вплив на планетарні аномалії гравітаційного поля, якщо ця оболонка підтримується впродовж тривалого геологічного часу в неоднорідному стані.

Оцінка наявності неоднорідних мас, які розміщені в глибинній частині мантії, і їхньої гравітаційної складової в аномальному гравітаційному полі планети неоднозначна через швидке ослаблення з відстанню впливу збурювальних мас на аномалії сили тяжіння та можливий гравітаційний вплив від компенсаційних мас (вони можуть заля-

гати на будь-якій глибині). Однак часто висловлюється припущення, що менші за порядком гармоніки в розкладі гравітаційного поля за кульовими функціями зумовлені насамперед неоднорідностями глибинної частини мантії планети, тоді як більші за порядком гармоніки відображають будову верхньої частини мантії [Phillips, Saunders, 1975]. Хоча це припущення до певної міри обґрунтовано, але воно також потребує переконливішої аргументації. Як приклад розглянемо модель неоднорідної структури планети, в якій випадковим способом розміщені аномалії густини, лінійне простягання яких менше, ніж довжина хвилі L для гармонік порядку $n = 2\pi R/L$, у розкладі зовнішнього гравітаційного поля в ряд за кульовими функціями. Отже, для такої моделі неоднорідні маси в нижній оболонці планети можуть робити істотний внесок тільки в гармоніки нижчого порядку, тоді як такі неоднорідності у верхній оболонці дають внесок у всі члени ряду. У межах цієї простої статистичної моделі вдається встановити лише приблизні значення латеральних аномалій густини, які, ймовірно, можуть перебувати в глибинних частинах мантії. Тому актуальним питанням залишається розроблення теорій інтерпретації гравітаційного поля планет, які могли б підтвердити чи заперечити наявність латеральної неоднорідної структури в глибинних шарах.

Вочевидь, основою інтерпретації повинна бути модель тривимірного розподілу густини планети, неодмінною умовою побудови якої є її відповідність визначеним параметрам гравітаційного поля та адекватність сучасним планетологічним і космогонічним уявленням.

Нижче описано побудовані за наведеною методикою моделі тривимірного розподілу густини для Землі, Венери, Марса та Місяця і дано інтерпретацію отриманих результатів.

Земля

За описаним вище алгоритмом виконано розрахунки з визначення тривимірного розподілу густини земних надр з використанням гармонічних коефіцієнтів відповідно до $n = 4; 20$ порядків моделі геопотенціалу [Garoschkin, 1973, Pavlis et al., 2008]. За неоднорідні аномальні маси в тілі Землі прийнято різницю тривимірного і одновимірного (радіального) розподілу густини

$$\Delta\delta_n = \delta_n(\rho, \theta, \lambda) - \delta_2(\rho). \quad (14)$$

На рис. 1–3 показано обчислені глобальні розподіли аномалій густини на вибраних глибинах вздовж радіуса Землі, які зумовлені гармонічними коефіцієнтами до 3-го і 20-го порядків. Перш ніж перейти до інтерпретації отриманих аномалій, відзначимо таке. По-перше, отримані результати тривимірного розподілу густини внаслідок використання гармонічних коефіцієнтів до 3-го порядку показують значно згладжені в горизонтальному простяганні аномалії густини в літосфері та верхній мантії планети. По-друге, залишається не з'ясованим, що

відображають ці неоднорідності: регіонально усереднений гравітаційний ефект дрібномасштабних неоднорідних мас чи довгохвильові аномалії густини, зумовлені єдиним джерелом гравітації. По-третє, в основу побудови тривимірних моделей густини покладено припущення про те, що гармонічні коефіцієнти зумовлені розподілом мас уздовж усього радіуса Землі. І хоча таке припущення не є достатньо обґрунтованим щодо достовірної прив'язки розподілу густини неоднорідних мас з глибиною, однак використаний метод, як буде показано далі, дозволяє зробити висновок про нижню межу розміщення неоднорідних мас, які можуть впливати на довгохвильові аномалії сили тяжіння. Отже, наведені зауваження вказують на значну складність інтерпретації визначених планетарних неоднорідностей густини з використанням гравіметричного методу.

Проаналізувавши літературні джерела, можна відзначити, що планетарні аномалії сили тяжіння багато авторів трактують по-різному. Так, до можливих причин, які впливають на аномальне гравітаційне поле Землі, можна віднести густинні неоднорідності, спричинені геодинамічними і термодинамічними напруженнями, температурними неоднорідностями мантії, існування первинних неоднорідностей, теплової і гравітаційної конвекції в мантії, фазові переходи в мантії тощо. Крім того, для інтерпретації аномалій сили тяжіння залучаються також дані про кореляцію з тепловим потоком, великомасштабними тектонічними структурами, глобальними аномаліями магнітного поля. З перерахованих вище причин впливає, що поки немає єдиної універсальної гіпотези, яка достатньо правдоподібно пояснювала б походження планетарних аномалій сили тяжіння. Тому в питанні їх інтерпретації доцільний комплексний підхід з використанням якнайбільшої кількості різних даних.

Останнім часом на основі розробленого методу сейсмічної томографії репрезентативну інформацію щодо розподілу неоднорідних мас у мантії Землі надають вимірювання відхилень часу проходження поздовжніх і поперечних сейсмічних хвиль від усереднених значень для стандартної моделі Землі [Dziewonski et al., 1977].

У результаті опрацювання цих даних вперше отримано сферичні коефіцієнти розкладу аномалій швидкостей V_p до 3-го порядку включно для п'яти оболонок (0–670 км, 670–1100 км, 1100–1500 км, 1500–2200 км, 2200–2886 км), які представляють кору і мантію планети. На рис. 4, запозиченому з роботи А. Дзієвонського [Dziewonski et al., 1977], наведено розподіли аномалій швидкостей V_p у шарі 0–670 км. Вибір для подальшої інтерпретації аномалій швидкостей V_p саме в цьому шарі зумовлений двома обставинами: по-перше, центри мас джерел великомасштабних аномалій сили тяжіння за розрахунками Ю.А. Тараканова [Тараканов, Черевко, 1978] залягають на глибині близько 1000 км і, по-друге, саме до цієї глибини ще простежується значуща кореляція аномалій швидкостей V_p (рис. 4) з аномаліями густини (рис. 1).

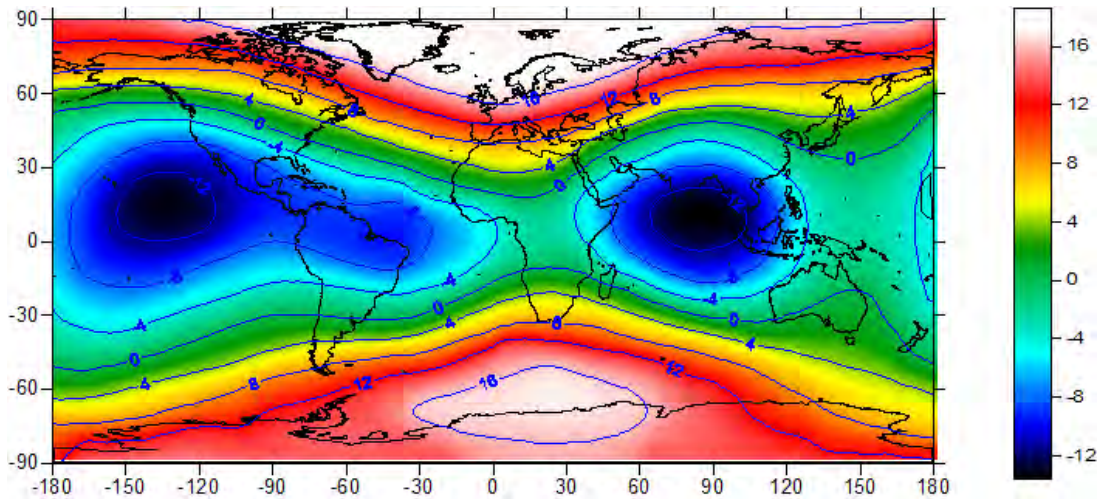


Рис. 1. Розподіл аномальної густини надр Землі (модель), зумовлений гармонічними коефіцієнтами до 3-го порядку на глибині 100 км (ізолінії проведені через $4 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$)

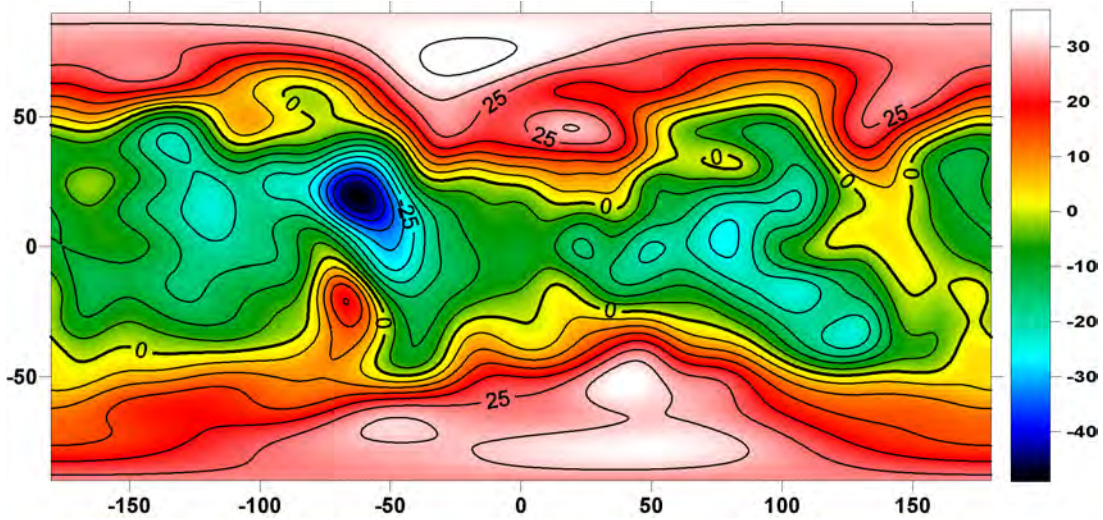


Рис. 2. Розподіл аномальної густини надр Землі (модель), зумовлений гармонічними коефіцієнтами до 20-го порядку на глибині 100 км (ізолінії проведені через $5 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$)

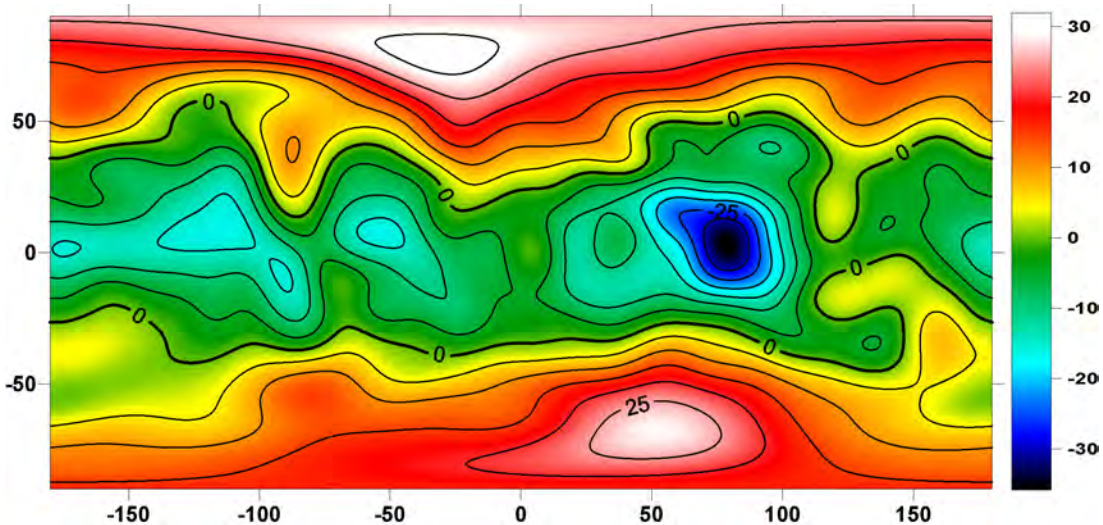


Рис. 3. Розподіл аномальної густини надр Землі (модель), зумовлений гармонічними коефіцієнтами до 20-го порядку на глибині 1000 км (ізолінії проведені через $5 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$)

Розглянемо тепер докладніше кореляцію між аномаліями густини й аномаліями швидкостей V_p , що добре простежується з порівняння рис. 1 та 4 і яка, ймовірно, зумовлена єдиною причиною – великомасштабною гравітаційною і тепловою конвекцією у верхній мантії. Справді, отримані оцінки варіацій густини неоднорідностей у мантії ($0,002 \text{ г/см}^3$) відповідають критичній величині різниці густини – $0,001 \text{ г/см}^3$ [Ранкорн, 1975], яка достатня для виникнення конвективних потоків з швидкостями, що узгоджуються з даними з глобальної тектоніки плит [Теркот, Шуберт, 1985]. Такі різниці густини можуть спричинятись різницею температур в 1°C [Ранкорн, 1975], що накопичуються за період у 10^6 років. Час релаксації напруження повинен бути такого самого порядку або меншим. Невеликі відхи-

лення температур від таких, що відповідають релаксованому стану, приводять до альтернативного припущення про існування в мантії температурних напружень [Жарков, 1963]. Наявність аномалій густини в мантії можна також пояснити і неоднорідним хімічним складом речовини [Dziewonski et al., 1977]. Проте два останні припущення суперечать концепції глобальної тектоніки плит, яка, як один з прийнятних рушійних механізмів, визнає конвективне переміщення мантії речовини. Тому викликає інтерес та обставина, що епіцентри мас зі зниженою густиною, оконтурені ізолініями на рис. 1, та аномалії зі зниженими швидкостями сейсмічних хвиль V_p (рис. 4) добре узгоджуються з положенням висхідних конвективних потоків, показаних на рис. 5 [Зоненшайн, Савостин, 1979].

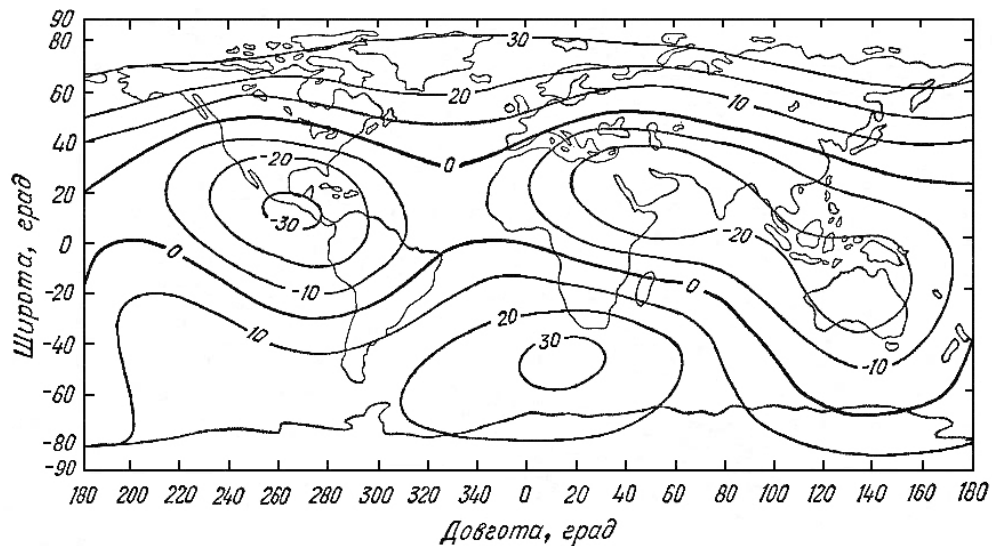


Рис. 4. Аномалії швидкості V_p в шарі 0–670 км за даними А. Дзієвонського та ін. [Dziewonski et al., 1977]

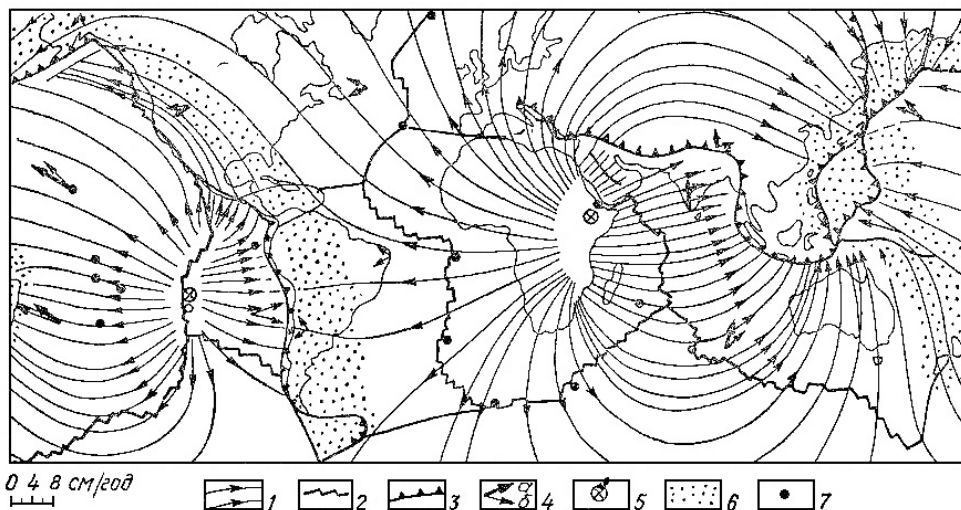


Рис. 5. Карта моделювання ліній течій в астеносфері та їх співвідношення з переміщеннями літосферних плит на поверхні Землі [Зоненшайн, Савостин, 1979]:
 1 – лінії течій; 2 – границя нарощування і сповзання літосферних плит; 3 – границя поглинання літосферних плит; 4 – напрямок переміщення літосферних плит, см/рік: а – відносно системи острівних дуг на заході Тихого океану, б – відносно системи гарячих точок; 5 – центри висхідних конвекційних течій; 6 – області низхідних течій; 7 – головні гарячі точки

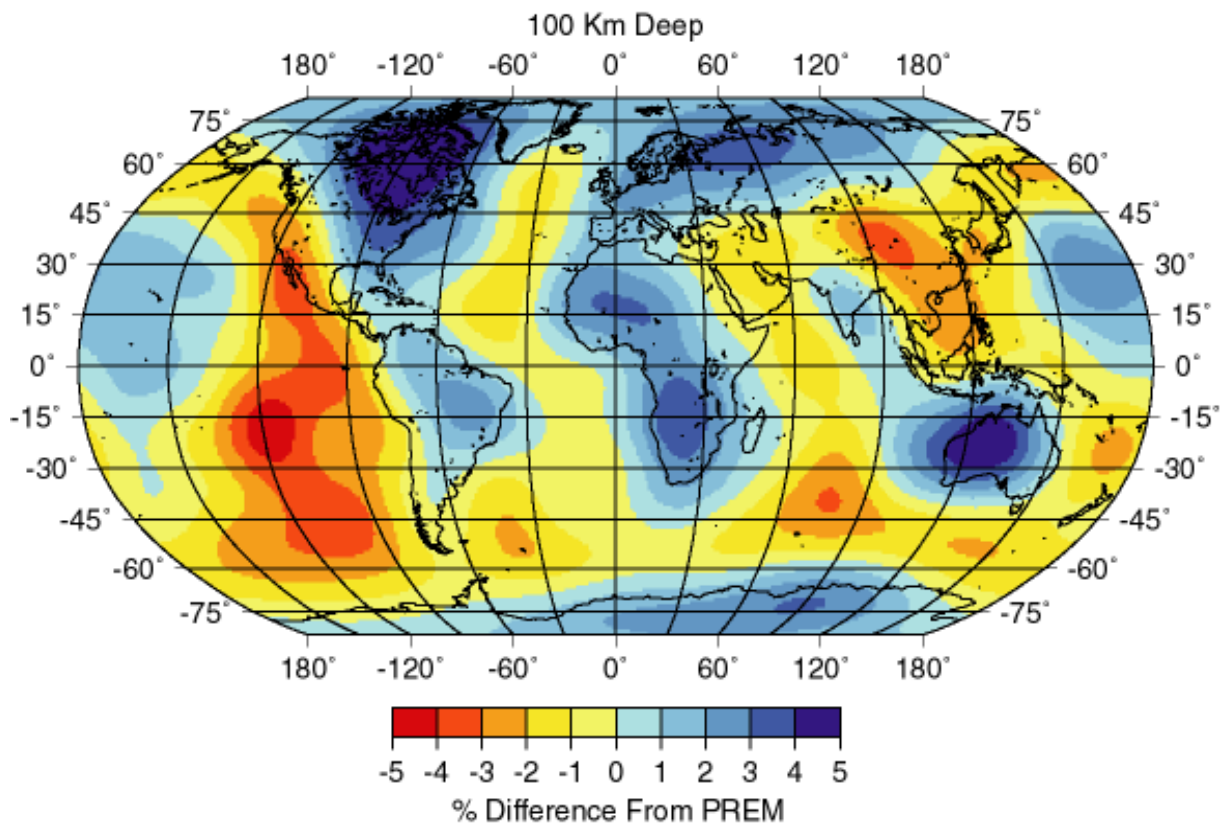


Рис. 6. Карта варіацій швидкості поперечних сейсмічних хвиль $\Delta V_s / V_s$ (шкала в %) для моделі PREM на глибині 100 км [Su, Woodward, 1994]

Вплив гармонік вищих порядків ($n=20$) зумовлений “короткохвильовими” аномаліями густини (див. рис. 2, 3), які локалізовані в літосфері й у верхніх шарах мантії (понад 1000 км). Побудована модель тривимірного розподілу густини з врахуванням гармонік до 20-го порядку виявляє цікаву закономірність перерозподілу неоднорідних мас в екваторіальній області на глибинах 100 і 1000 км, що може підтверджувати компенсаційний механізм геїзостації [Тяпкін, 1998; Церклевич, 2009].

Порівняння розподілу аномальної густини надр Землі (рис. 2) з рис. 6, на якому показано варіації швидкості поперечних сейсмічних хвиль ($\Delta V_s / V_s$, в %) для моделі PREM на глибині 100 км за результатами їх розкладу за сферичними гармоніками до 12-го порядку, не показують тісної кореляції. Якщо на рис. 6 чітко простежується, що під континентами верхня мантія холодна і вона характеризується підвищеними швидкостями поширення сейсмічних хвиль, то з рис. 2 такої закономірності в розподілі густини не виявляється, оскільки гармонічні коефіцієнти 2-го порядку C_{22} і S_{22} розкладу геопотенціалу суттєво впливають на розподіл густини в екваторіальній зоні (рис. 7).

Можна припустити, що гармонічні коефіцієнти 2-го порядку відображають тривісність фігури Землі й відхилення від гідростатично рівноважного

стану, а ці відхилення підтримуються за рахунок дії статичних напружень у нижній мантії планети.

Отже, є всі підстави вважати, що аномалії сили тяжіння планетарного масштабу пов’язані з інтегральним впливом неоднорідностей густини в тілі Землі, які розташовані по всій товщині тектоносфери до глибин 1000 км. Природа планетарних неоднорідних мас добре узгоджується з великомасштабним конвективним перетіканням речовини у верхній мантії.

Венера

Венера – це планета земного типу, яка найбільше нагадує Землю. Вона має приблизно такі самі діаметр, масу і середню густину. Для побудови моделей внутрішньої будови Венери традиційно використовують рівняння гідростатичної рівноваги, стан речовини за сильного стискання та за умови збереження маси. Однак певний інтерес становить побудова ще таких моделей Венери, які задовольняли б дані про її гравітаційне поле. Для побудови тришарових моделей, що складаються з кори, мантії і ядра, необхідно задати значення глибин розділу структурних шарів і стрибки в розподілі густини вздовж радіуса. Для розрахунку моделей Венери використано дані, наведені в таблиці. Гармонічні коефіцієнти до 20-го порядку взято з моделі гравітаційного поля Венери [Konopliv et al., 1999].

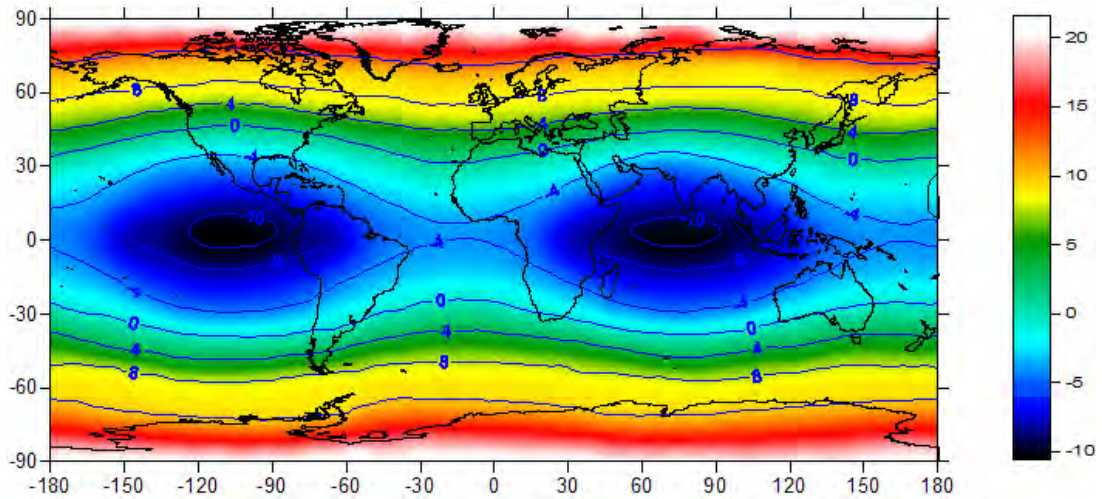


Рис. 7. Розподіл аномальної густини надр Землі (модель), зумовлений гармонічними коефіцієнтами 2-го порядку на глибині 100 км (ізолінії проведені через $4 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$)

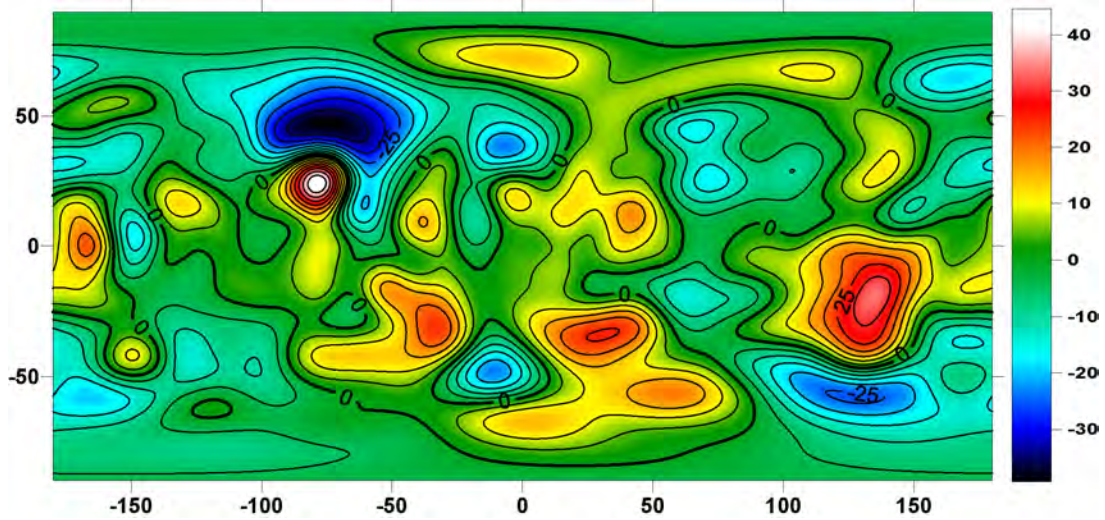


Рис. 8. Розподіл аномальної густини надр Венери (модель), зумовлений гармонічними коефіцієнтами до 20-го порядку на глибині 100 км (ізолінії проведені через $5 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$)

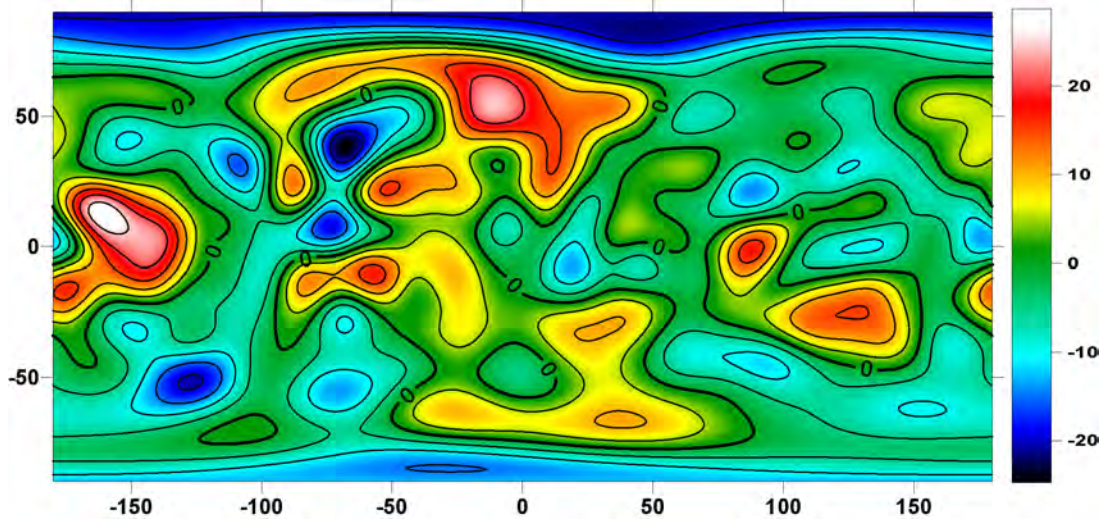


Рис. 9. Розподіл аномальної густини надр Венери (модель), зумовлений гармонічними коефіцієнтами до 20-го порядку на глибині 1000 км (ізолінії проведені через $5 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$)

Момент інерції для Венери неможливо розрахувати за гідростатичною теорією внаслідок того, що параметр $g = \omega^2 R^3 / fM$ в сотні (~450) разів менший від зональної гармоніки J_2 , що пов'язано з повільним обертанням планети навколо своєї осі. У зв'язку з цим значення моменту інерції підбиралося так, щоб густина кори для розрахованої моделі приблизно дорівнювала $2,9 \text{ г/см}^3$, а це значення вважається найімовірнішим.

Оскільки описана вище методика дозволяє знаходити тривимірний розподіл густини, то це дає можливість оцінити неоднорідності густини всередині планети. На рис. 8 і 9 у вигляді картосхем представлено розподіл аномалій густини $\Delta\delta$ Венери на глибинах 100 і 1000 км. На рис. 8 виділяються п'ять екстремумів з додатними аномаліями густини і чотири екстремуми з від'ємними. Якісно така сама картина розподілу аномалій густини зберігається і на глибині 1000 км (рис. 9), хоча загальний рисунок тривимірного розподілу густини дещо інший. Можна припустити, що в приповерхневому шарі Венери (глибиною до ~100 км) горизонтальні неоднорідності проявляють себе в планетарних особливостях її топографії, підтверджуючи існування ізостатичної рівноваги в класичному розумінні. На противагу цьому, розподіл аномальної густини надр Венери на глибині 1000 км підтверджує компенсацію поверхневих аномалій розподілу густини, які простежуються на рис. 8.

Марс

З опублікуванням перших моделей гравітаційного поля і топографії Марса встановлено наявність кореляційного зв'язку між аномаліями сили тяжіння і топографічними висотами як в плані їх розміщення, так і за значущістю коефіцієнтів кореляції (див. [Мещеряков, Церклевич, 1987] і наведену там бібліографію). Виявлена закономірність наводить на думку, що найочевидніший внесок у гравітаційне поле планети робить її топографія, а латеральні неоднорідності густини надр планети мають другорядне значення. Однак така інтерпретація гравітаційного поля приводить до припущення, що для Марса характерна менш повна регіональна ізостатична компенсація, ніж для Землі. Навіть більше, на окремих значних територіях передбачаються істотні відхилення марсіанської кори від стану ізостатичної рівноваги. А таке припущення вимагає збереження впродовж геологічно довгих періодів часу великих надгідростатичних напружень в корі планети, що можливо тільки за рахунок існування потужної і міцної літосфери або збільшення в'язкості верхньої мантії. Тому заслуговує на увагу робоча гіпотеза про великомасштабні глибинні латеральні неоднорідності надр Марса, які простежуються до ядра і динамічно зв'язані з геологічними структурами планети на її поверхні. Зауважимо також, що для Землі сейсміка фіксує надзвичайно важливий для тектоніки і геодинаміки феномен: наявність тихоокеанської неоднорідності аж до ядра планети [Пушаровский, 1997]. Отже, можна припустити, що в ході акреції планет гомогенізації не відбулося.

Тому правомірно говорити про первинну тектонічну і геодинамічну неоднорідність Марса, яка відобразилась у сучасному вигляді планети.

Якісно підтвердити це припущення може тривимірною моделлю розподілу густини Марса. На рис. 10 і 11 показано карти розподілу горизонтальних неоднорідностей густини надр Марса для глибин 100 і 1700 км.

Привертає увагу насамперед найбільша додатна аномалія розподілу густини в надрах планети, яка приурочена до вулканічних структур Olympus Mons (18N; 133W) і Tharsis Montes (12N-16S; 101-125W). Характерним є те, що ця аномальна неоднорідність простежується до значних глибин, які межують з ядром планети. Можна допустити, що на неотектонічному етапі еволюції планети легкий матеріал мантії, що утворився на границі ядро – мантія внаслідок диференціації речовини, почав спливати вгору у верхню мантію. У результаті в мантії виникла хімічна конвекція, рушійною силою якої є істотна різниця густини речовини, зумовлена її різним складом. Хімічна конвекція в процесі еволюції планети підсилилась тепловою конвекцією. За рахунок цього відбулось перетікання гарячих тепломасопотоків від границі ядро – мантія до літосфери невеликих пльомів, які принесли з собою флюїд, що забезпечив сильне розм'якшення мантійної літосфери. Залежно від об'єму флюїду в пльомі, відбувалася часткова або повна ерозія мантійної літосфери, що зумовило великі варіації величини підняття на відстанях у декілька тисяч кілометрів, деформуючи на значну висоту поверхню планети. Такі варіації добре видно на топографічній карті Марса, де величина новітнього підняття сягає 8–10 км. Для майже одночасного підняття на великій території матеріал пльомів, який піднявся в окремих місцях з глибин, повинен був розтікатися на тисячі кілометрів уздовж підшви літосфери. Ландшафт цієї території визначила вулканічна діяльність з найбільшими у Сонячній системі щитоподібними вулканами, які досягають висот 20–27 км. Потіки рідкої лави розтікалися по поверхні, застигали, по них текли новітні потоки. Ці "річки", що скам'яніли, зосереджені навколо щитоподібних вулканів.

Великомасштабні додатні аномалії густини, які охоплюють структури Isidis Planitia (5-25S; 260-280W), Syrtis Major Planitia (0-20S; 280-300W) та Utopia Planitia (35-55S; 210-280W) у східній частині півкулі, чітко виділяються на невеликих глибинах 50–100 км у літосфері. Від'ємні аномалії густини на невеликих глибинах зосереджені на заході в Amazonis Planitia (5-35N; 150-170W) та зі східної сторони відносно Tharsis Montes (12N-16S; 101-125W), охоплюючи Valles Marineris (0-17N; 32-95W), Lunae Planum (0-20N; 58-75W) та Hellas Planitia (30-55N; 275-310W). Тобто більшість додатних і від'ємних аномалій густини в літосфері корелюють з тектонічними структурами топографічної поверхні Марса. На значній глибині картина розподілу додатних та від'ємних аномалій густини відрізняється від такого на невеликих глибинах, за винятком Olympus Mons та Tharsis Montes, що підтверджує їх глибинне утворення.

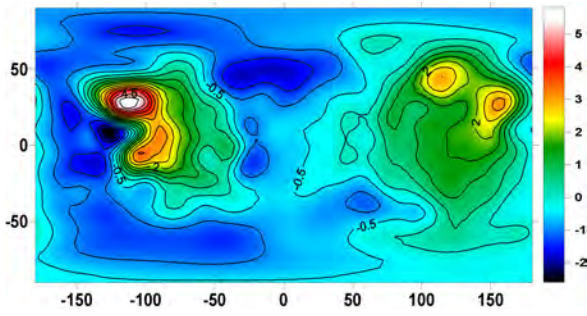


Рис. 10. Розподіл аномальної густини надр Марса (модель), зумовлений гармонічними коефіцієнтами до 20-го порядку на глибині 100 км (ізолінії проведені через $5 \cdot 10^{-3}$ г/см³)

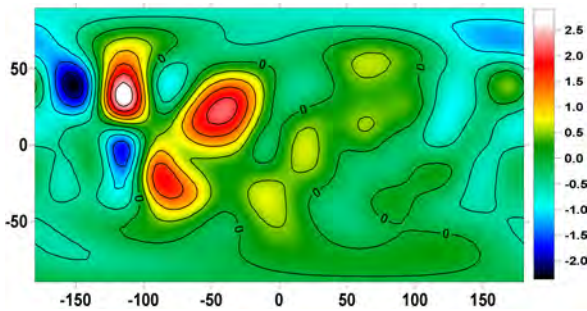


Рис. 11. Розподіл аномальної густини надр Марса (модель), зумовлений гармонічними коефіцієнтами до 20-го порядку на глибині 1700 км (ізолінії проведені через $5 \cdot 10^{-3}$ г/см³)

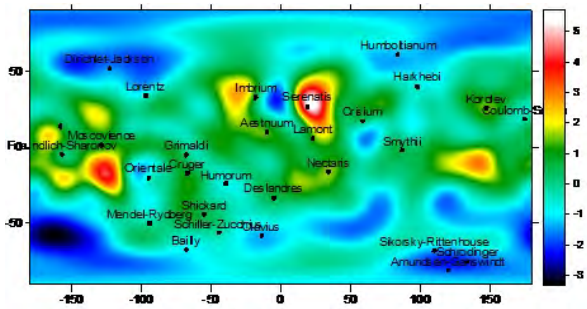


Рис. 12. Мозаїчна картина горизонтальних неоднорідностей густини Місяця (модель, глибина 100 км, шкала кольорів з інтервалом $5 \cdot 10^{-3}$ г/см³, позначено морфологічні структури (маскони))

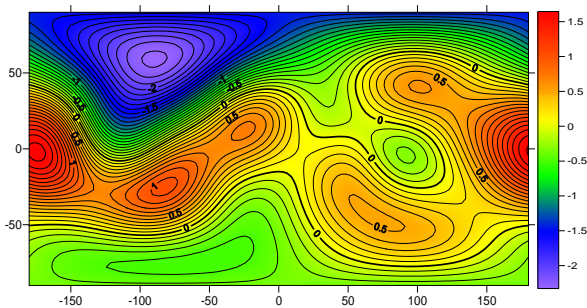


Рис. 13. Розподіл аномальної густини надр Місяця (модель), зумовлений гармонічними коефіцієнтами до 20-го порядку на глибині 1400 км (ізолінії проведені через $5 \cdot 10^{-3}$ г/см³)

Місяць

Для Місяця аномальне гравітаційне поле можна інтерпретувати збурювальним впливом латеральних неоднорідностей густини мантії або великомасштабними варіаціями товщини кори. На рис. 12 і 13 показано карти розподілу горизонтальних неоднорідностей густини надр Місяця для глибин 100 і 1400 км, які вказують на те, що аномалії густини є більш поверхневими, порівняно з Марсом, а глибинні неоднорідності, мабуть, впливають лише на гармоніки 2-го порядку і характеризують надгидростатичну еліптичність фігури.

Для Місяця найбільші аномалії густини зосереджені в приповерхневих горизонтах, корелюють з масконами і, ймовірно, підтримуються за рахунок напруженого стану літосфери. Домінуючі додатні аномалії густини на глибині 100 км (рис. 12) корелюють з місячними басейнами (масконами).

Ключовим питанням, яке пов'язане з інтерпретацією масконів, є відділення збурюючих складових у гравітаційних аномаліях від топографії, басейнового заповнення і впливу мантії під цим басейном. У багатьох теоретичних роботах (див. [Сагітов, 1979; Phillips, Lambeck, 1980; Wieszorek, 2006] і наведену там бібліографію) висловлюється думка, що у формуванні масконів головну роль відіграють два фактори – мантіїні неоднорідності, які переважно інтерпретуються як підняття границі кора – мантія, і підтримка поверхневих базальтових потоків у місячних морях за рахунок напруженого стану літосфери. Більшість авторів [Сагітов, 1979; Phillips, Lambeck, 1980; Watts, 2001] вважають, що для Місяця маскони ізостатично не врівноважені, тому їх існування зумовлено або значною твердістю зовнішньої оболонки Місяця, яка здатна досить довго витримувати напруження, або великою в'язкістю мантіїного матеріалу, а це призводить до того, що час, який пройшов з моменту утворення масконів, недостатній для їх ізостатичного врівноваження.

Залишається нез'ясованим, на яких глибинах неоднорідні маси розміщені, оскільки глибина залягання аномальних мас може суттєво вплинути на оцінку їх величини. Так, для Землі (див. [Мещеряков, Церклевич, 1987]) за багатьма оцінками вважається, що глибини центрів мас значних аномалій сили ваги розміщені в межах 800–1000 км. Для Місяця нижня межа центрів мас планетарних аномалій розміщена на глибині приблизно 500 км, а для Марса на глибині 750–1000 км. Отже, якщо прийняти за нижню границю сферичних оболонок наведені глибини центрів мас, то можна очікувати дещо більші варіації горизонтальних неоднорідностей густини у верхніх оболонках Марса та Місяця.

Висновки

Аналіз тривимірних моделей розподілу густини планет земної групи, побудованих на основі параметрів гравітаційного поля та інших даних, приводить до таких висновків:

1. Параметри зовнішнього гравітаційного поля планети дають інформацію про її внутрішню

будову: кожна гармоніка потенціалу відображає інтегровану умову, яку задовольняє розподіл густини надр планети. Побудовані моделі тривимірного розподілу густини надр планет ґрунтуються на припущенні, що джерела аномальних мас, які впливають на стоксові коефіцієнти, розміщені по всій глибині – від поверхні планети до її центра. Останнє припущення впливає з самої методики побудови тривимірних моделей густини і приводить до істотно згладжених значень аномалій густини у верхніх оболонках планети.

2. Довгохвильові аномалії сили ваги Землі пов'язані з неоднорідностями розподілу густини в шаровій оболонці тектоносфери до глибин ~1000 км. Природа планетарних неоднорідних мас добре узгоджується з великомасштабним конвективним перетіканням речовини у верхній мантії. Гармонічні коефіцієнти 2-го порядку розкладу геопотенціалу відображають відхилення розподілу густини (і фігури Землі) від гідростатично рівноважного стану.

3. Горизонтальні неоднорідності Венери мають приблизно такі самі значення, як і для Землі. У приповерхневому шарі Венери (завглибки до 1000 км) горизонтальні неоднорідності проявляють себе в планетарних особливостях її топографії, якщо фізичну природу аномалій густини пов'язувати з механізмом встановлення ізостатичної рівноваги.

4. Дослідження розподілу неоднорідностей густини в мантії Марса дають підстави вважати, що саме глибинні неоднорідності створюють в основному таке "грубе" гравітаційне поле планети. Глибинний розподіл аномальних мас надр відображає негідростатичний стан планети, що, ймовірно, виник в її ранній історії. Тому можна припустити, що в ході акреції планети гомогенізація не відбулась і на ранній еволюційній стадії було закладено первинну тектонічну і геодинамічну неоднорідність Марса, яка позначилась на сучасному вигляді планети.

5. Розподіл горизонтальних неоднорідностей густини надр Місяця для глибин 100 і 1400 км вказує на те, що найбільші аномалії густини є поверхневими порівняно з Марсом і корелюють з масконами, а глибинні неоднорідності впливають тільки на гармоніки 2-го порядку і характеризують надгідростатичну еліптичність його фігури.

Література

Жарков В.Н. К задаче о термоупругих напряжениях в теле Земли // Изв. АН СССР. Сер. Геофиз. – 1963. – 7. – С. 989-999.

Заяць О.С. Про використання даних космічних апаратів при вивченні гравітаційного поля і внутрішньої будови Місяця // Новітні досягнення геодезії, геоінформатики та землевпорядкування. Європейський досвід. – Чернівці. – 2005. – Вип. 3. – С. 195-199.

Зоненшайн П.П., Савостин Л.А. Введение в геодинамику. – М.: Недра, 1979. – 311 с.

Картвелишвили К.М. Планетарная плотностная модель и нормальное гравитационное поле Земли. – М.: Наука, 1982. – 95 с.

Лаврентьев М.М. О некоторых некорректных задачах математической физики. – Новосибирск: Наука, 1962. – 96 с.

Мещеряков Г.А. О корректности одной обратной задачи теории потенциала // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. – 1969. – № 8. – С. 54–59.

Мещеряков Г.А., Церклевич А.Л. Гравитационное поле, фигура и внутреннее строение Марса. – К.: Наук. думка, 1987. – 240 с.

Мещеряков Г.А., Фыс М.М. О биортогональных системах внутри эллипсоида // Теоретические и практические проблемы вычислительной математики. – М.: Наука, 1981. – С. 120.

Мориц Г. Фигура Земли: Теоретическая геодезия и внутреннее строение Земли. – К.: Наук. думка, 1994. – 240 с.

Пушаровский Ю.М. Сейсмография, тектоника и глубинная геодинамика // Вестник отделения наук о Земле РАН. Электронный научно-информационный журнал. – 1997. – № 2. [Электронный ресурс] <http://www.scgis.ru/russian/cp1251/dgggms/2-97/main.html>.

Ранкорн С. Динамические процессы в нижней мантии // Верхняя мантия. – М.: Мир, 1975. – С. 286–298.

Сагитов М.У. Лунная гравиметрия. – М.: Наука, 1979. – 432 с.

Тараканов Ю.А., Черевко Т.И. Интерпретация крупнейших гравитационных аномалий Земли // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1978. – № 4. – С. 25–42.

Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика: Геологическое приложение физики сплошных сред. – М.: Мир, 1985. – 376 с.

Тяпкин К.Ф. Физика Земли. – К.: Вища школа, 1998. – 291 с.

Вивчення неоднорідностей внутрішньої будови Марса та Місяця за даними їхніх гравітаційних полів / А.Л. Церклевич, О.С. Заяць, П.М. Зазуляк та ін. // Кинематика и физика небесных тел. – 2010. – 26, № 2. – С. 59-73.

Церклевич А.Л. Изостазия та ізостатичні моделі інтерпретації гравітаційного поля планет земної групи (сучасний стан проблеми) // Геодинаміка. – 2009. – № 1 (8). – С. 5–23.

Dziewonski A.M., Hager B.H., O'Connell R.J. Large-scale heterogeneities in the lower mantle // J. Geophys. Res. – 1977. – 82, № 2. – P. 239–255.

Gaposchkin E.M. Smithsonian Standard Earth (III) // SAO Special Report. – 1973. – № 535. – 365 p.

Konopliv A.S., Asmar S.W., Yuan D.N. Recent gravity models as a result of the Lunar Prospector mission // Icarus. – 2001. – 150. – P. 1–18.

Konopliv A.S., Banerdt W.B., Sjogren W.L. Venus gravity: 180th degree and order model // Icarus. – 1999. – 139. – P. 3–18.

Lemoine F.G. Smith D.D., Rowlands D.E. et al. An improved solution of the gravity field of Mars (GMM-2B) from Mars Global Surveyor //

- J. Geophys. Res. – 2001. – 106, № E10. – P. 23359–23376.
- Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C. et al. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008 // EGU General Assembly. Geophysical Research Abstracts. – 2008. – Vol. 10. – P. 2. (EGU2008–A–01891).
- Phillips R.J., Saunders R.S. The isostatic state of martian topography // J. Geophys. Res. – 1975. – 80, № 20. – P. 2893–2897.
- Su W.-J., Woodward R.L., Dziewonski A.M. Degree-12 Model of Shear Velocity Heterogeneity in the Mantle // J. Geophys. Res. – 1994. – 99 (4). – P. 4945–4980.
- Watts A.B. Isostasy and Flexure of the Lithosphere. – Cambridge University Press. – 2001. – 458 p.
- Wieczorek M.A., Jolliff B.L., Amir Khan. The Constitution and Structure of the Lunar Interior // Reviews in Mineralogy & Geochemistry. – 2006. – 60. – P. 221–364.

ГРАВИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ТРЕХМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

А.Л. Церклевич, А.С. Заяц, М.М. Фыс

Рассмотрено интерпретацию планетарных аномалий гравитационного поля Земли, Венеры, Марса и Луны во взаимосвязи с внутренним неоднородным строением этих планет. Исходной информацией для исследований были модели гравитационного поля указанных планет до 20-го порядка и степени, а также параметры трехслойной модели (кора, мантия, ядро) каждой из этих планет и соответствующие планетарные параметры.

Ключевые слова: гравитационная модель распределения плотности; степенные моменты плотности; гармонические коэффициенты разложения гравитационного поля; аномалии силы тяжести; обратная гравиметрическая задача.

EARTH GROUP PLANETS GRAVITATIONAL MODELS OF 3-D DENSITY DISTRIBUTIONS

A.L. Tserklevych, O.S. Zayats, M.M. Fys

In the paper the interpretation of planetary anomalies in the gravitational field of the Earth, Venus, Mars and Moon in their relationship with the internal inhomogeneous structure of those planets is considered. The model of the gravitational field of named planets up to 20th order and degree and the three-layer models (crust, mantle and core) of the planets and its planetary parameters was taken as the initial information for modelling.

Key words: gravitational model of density distribution; density moments; spherical harmonics coefficients of gravity field; gravity anomalies; inverse gravimetric task.