

КОРЕЛЯЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ГРАВІТАЦІЙНОГО ПОЛЯ І ТОПОГРАФІЇ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЇ ГРУПИ

Виконано кореляційний аналіз рівневої та фізичної поверхонь Землі, Венери, Марса і Місяця. Подано інтерпретацію кореляційних залежностей між висотами рівневої та фізичної поверхонь для цих планет. Показано, що великомасштабні тектонічні особливості Марса, Венери і Місяця впливають на їх гравітаційні фігури значно сильніше, ніж для Землі, для якої вони майже повністю компенсуються.

Ключові слова: кореляційний аналіз; ковзні коефіцієнти кореляції; висоти рівневої поверхні; гравітаційна фігура планети; ізостатичний стан.

Вступ

За останні десятиріччя у результаті реалізації космічних програм дослідження ближнього і віддаленого космосу значно розширились можливості вивчення гравітаційного поля і топографії Землі та планет земної групи. Це стало можливим завдяки зібраній інформації з радіотраєкторних спостережень за КА на орбітах навколо планет і проведеними на КА альтиметричними вимірюваннями. Суттєвого прогресу уже досягнуто у вивченні гравітаційного поля Марса, Венери та Місяця, хоча роздільна здатність в їх просторовому покритті і точність отриманих даних ще не така висока, як для Землі. Вся нагромаджена інформація потребує опрацювання та інтерпретації з метою поглибленого пізнання внутрішньої структури і геологічної будови Землі та планет, розуміння механізму геодинамічних процесів, для яких гравітація має вирішальне значення.

Постановка завдання

Даними, які описують гравітаційне поле та топографію планет, є, зокрема, розклад потенціалу сили ваги і висот рельєфу в ряд за кульовими функціями. Для планетарної геодезії і фізики планет найбільший інтерес становить вивчення перших членів розкладу в ряд за кульовими функціями гравітаційного поля і топографії, оскільки вони характеризують планетарні особливості фігури та будови планет. Гравітаційне поле і топографічна поверхня відображають певною мірою весь попередній шлях геологічної еволюції планет. Водночас, за космогонічними уявленнями, планети земної групи знаходяться на різних етапах еволюції. Тому деяку інформацію про їх еволюцію, зокрема, про ізостатичний стан і глобальні особливості тектогенезу можна отримати за даними кореляційного аналізу довгохвильових компонентів рельєфу рівневої та топографічної поверхонь планет з позицій порівняльного планетологічного аналізу. Для цієї мети найкраще підходять статистичні методи, які засновані на використанні теорії випадкових функцій та кореляційного аналізу.

Визначення кореляційного зв'язку між висотами рівневої та фізичної поверхонь планет

Для подальших досліджень приймемо як випадкові функції гармонічні коефіцієнти $\overline{C}_{nm}^G, \overline{S}_{nm}^G$

і $\overline{C}_{nm}^T, \overline{S}_{nm}^T$ розкладу висот рівневої та фізичної поверхонь планети в ряди за сферичними функціями. Ці системи гармонічних коефіцієнтів передбачаються центрованими і некорельованими між собою.

Розглянемо статистичні характеристики, які можуть бути використані для порівняльного аналізу гравітаційної та геометричної фігур планет: коефіцієнти кореляції і взаємнокореляційну функцію. Наведемо основні поняття та необхідні формули, за якими виконуватимуться розрахунки [Мещеряков, Церклевич, 1987].

Висоти рельєфу фізичної і рівневої поверхонь подамо у вигляді:

$$h = R \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n h_{nm} \Lambda_{nm}, \quad (1)$$

$$\text{де } h_{nm}^G = \left[\overline{C}_{nm}^G; \overline{S}_{nm}^G \right], \text{ або } h_{nm}^T = \left[\overline{C}_{nm}^T; \overline{S}_{nm}^T \right],$$

$$\Lambda_{nm} = \begin{cases} \cos m\lambda \\ \sin m\lambda \end{cases} P_{nm}(\cos \theta).$$

Кореляційну залежність між полями висот рельєфу рівневої та фізичної поверхонь відображають порядкові і загальні коефіцієнти кореляції та взаємнокореляційна функція.

Порядкові коефіцієнти кореляції між гармоніками h_{nm}^G і h_{nm}^T для певного порядку можна обчислити за формулою:

$$r_n(h^G, h^T) = \frac{\text{cov}_n(h^G, h^T)}{\left[D_n(h^G) \cdot D_n(h^T) \right]^{1/2}}, \quad (2)$$

$$\text{де } \text{cov}_n(h^G, h^T) = \sum_{m=0}^n \left(\overline{C}_{nm}^G \overline{C}_{nm}^T + \overline{S}_{nm}^G \overline{S}_{nm}^T \right),$$

а порядкові дисперсії сферичних гармонік визначають як

$$D_n(h^G) = \sum_{m=0}^n \left[\left(\overline{C}_{nm}^G \right)^2 + \left(\overline{S}_{nm}^G \right)^2 \right]; \quad (3)$$

$$D_n(h^T) = \sum_{m=0}^n \left[\left(\overline{C}_{nm}^T \right)^2 + \left(\overline{S}_{nm}^T \right)^2 \right]. \quad (4)$$

Загальний коефіцієнт кореляції для гармонік $N_1 - N_2$ задається формулою

$$r_{N_1-N_2}(h^G, h^T) = \frac{\sum_{n=N_1}^{N_2} \text{cov}_n(h^G, h^T)}{\left[\sum_{n=N_1}^{N_2} D_n(h^G) \cdot \sum_{n=N_1}^{N_2} D_n(h^T) \right]^{1/2}}. \quad (5)$$

Статистичний зв'язок між полями висот рельєфу рівневої та фізичної поверхонь характеризує також взаємнокореляційна функція (ВКФ):

$$K_{1,2}(\psi) = \sum_{n=2}^N D_n(h^G, h^T) P_n(\cos \psi). \quad (6)$$

Зазначимо, що в загальному випадку ВКФ не має максимуму, якщо сферична відстань $\psi = 0^\circ$. Нормування ВКФ виконують діленням на добуток стандартів $\sigma(h^G)$ і $\sigma(h^T)$

$$\bar{K}_{1,2}(\psi) = K_{1,2}(\psi) / (\sigma(h^G) \cdot \sigma(h^T)),$$

$$\sigma(h^G) = [D_n(h^G)]^{1/2}, \quad \sigma(h^T) = [D_n(h^T)]^{1/2}. \quad (7)$$

При інтерпретації кореляційного зв'язку між полями висот рельєфу рівневої та фізичної поверхонь за ВКФ особливий інтерес становлять її екстремальні значення. Додатні екстремуми ВКФ вказують на наявність прямої лінійної залежності між двома досліджуваними полями і відповідають значенням аргументу ψ , що характеризує площинне простягання корельованих аномальних особливостей висот точок рівневої та фізичної поверхонь.

Розглянемо тепер кореляційний зв'язок між полями висот рельєфу рівневої та фізичної поверхонь досліджуваних планет. Для отримання числових значень коефіцієнтів кореляції і ВКФ були використані дані, які наведені в таблиці. Зміни значень порядкових кореляцій між гармоніками h_{nm}^G і h_{nm}^T для Землі (\oplus), Венери (\ominus), Марса (\oplus) і Місяця (\ominus) показано на рис. 1.

Привертають увагу значущі коефіцієнти кореляції $r_n(h^G, h^T)$, отримані для Марса.

Загальний коефіцієнт кореляції $r_{2-16}(h^G, h^T)$ становить 0,71. Ця величина є надійним значенням для 99 % рівня довіри, тобто ймовірність того, що встановлена кореляційна залежність вважається випадковою, становить менше 1 %. Для Венери також значуща кореляція між полями висот рельєфу рівневої і фізичної поверхонь. Проте для Землі між гармоніками h_{nm}^G і h_{nm}^T низького порядку не існує помітної кореляції, натомість кореляція стає позитивною для $n \geq 6$, а загальна кореляція за $n = 6-16$ виявляється значущою для 99 % рівня довіри. Кореляція між гармоніками h_{nm}^G і h_{nm}^T для Місяця є значущою тільки для $n = 2-4$, а для гармонік вищого порядку коефіцієнти кореляції не є ні значущими, ні стійкими за знаком.

На рис. 2 показані порядкові коефіцієнти кореляції між сферичними гармоніками сучасних моделей топографії [Smith et al., 1997, 1999; GTDR 3.2: Venus topography; SRTM: Earth topography model] і гравітаційного поля планет [NGA/NASA EGM96, Konopliv et al., 1999, 2001, 2006].

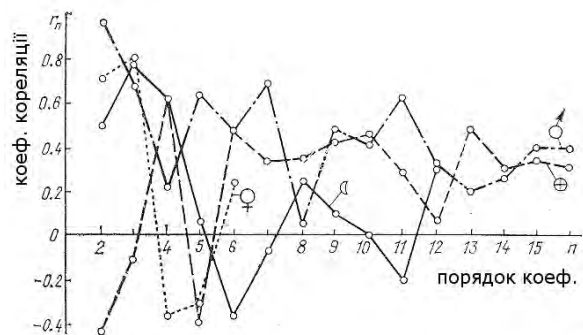


Рис. 1. Порядкові коефіцієнти кореляції між сферичними гармоніками низьких порядків розкладу висот рельєфу рівневої і фізичної поверхонь планет

Вихідні дані для обчислення висот рельєфу рівневої та фізичної поверхонь планет

Планета	Гармоніки h_{nm}^G	Посилання	Гармоніки h_i^T, h_{nm}^t	Посилання	Середній радіус, км
Земля	16x16*	[Lerch et al., 19810]	16x16**	[Balmino et al., 19730]	6371
Венера	6x6	[Sjogren et al., 19830]	6x6	[Бородин и др., 19830]	6052
Марс	16x16	[Balmino et al., 19820]	16x16***	[Bills et al., 19780]	3390
Місяць	12x12	[Bills et al., 19800]	12x12	[Bills et al., 19770]	1738

* Для Марса і Землі зональна гармоніка \bar{C}_{20}^G встановлювалась такою, що дорівнює нулю.

** Використовувались коефіцієнти для еквівалентної топографічної маси.

*** Гармоніка \bar{C}_{20}^T для Марса прирівнювалась $\bar{C}_{20}^G - \bar{C}_{20}^G = -0,0002578$.

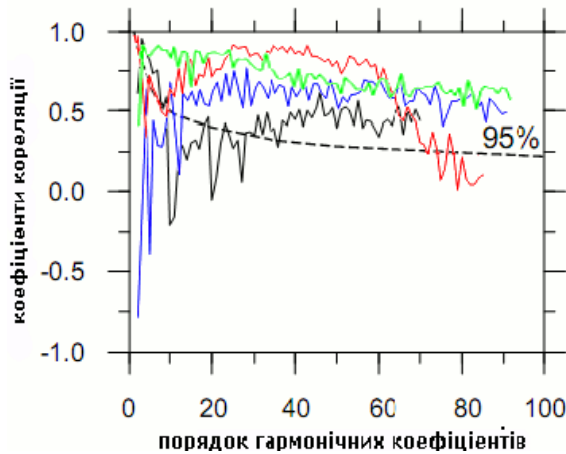


Рис. 2. Порядкові коефіцієнти кореляції між сферичними гармоніками сучасних моделей топографії та гравітаційного поля планет (синім кольором позначені порядкові коефіцієнти кореляції для Землі, зеленим – для Венери, червоним – для Марса, чорним – для Місяця)

Чітко відстежується значуща додатна кореляція між топографією і гравітаційним полем для Марса і Венери. Для Місяця кореляційна залежність між сферичними гармоніками для $n=10-30$ не є значущою і, мабуть, існування масконів суттєво вплинуло на таку закономірність. Гармонічні коефіцієнти за межами виділеного ряду показують значущу додатну кореляцію. Для Землі додатна значуща кореляція величиною 0,6 визначена для гармонічних коефіцієнтів, починаючи з $n=12-15$ до $n=200$, де вона починає зменшуватись із збільшенням порядку коефіцієнтів і є суттєво від'ємною для низьких гармонік розкладу топографії та гравітаційного поля за сферичними функціями.

Кореляційну залежність між полями висот рельєфу рівневої і фізичної поверхонь ілюструють також їх ВКФ (рис. 3). Графіки зміни ВКФ наочно показують тісний зв'язок між двома фізичними полями залежно від величини зсуву сферичної відстані ψ . Так, тільки для Марса і Венери виявляється тісна кореляційна залежність між полем висот рельєфу рівневої поверхні і полем висот його фізичної поверхні. Для Землі і Місяця взаємна кореляція цих полів є неістотною. Отже, порядкові $r_n(h^G, h^T)$ і загальні $r(h^G, h^T)$ коефіцієнти кореляції, а також ВКФ, які визначенні за коефіцієнтами h_{nm}^G, h_{nm}^T , характеризують статистичну ймовірну залежність між полями висот рельєфу рівневої і фізичної поверхонь планет.

Розглянемо тепер кореляційну залежність між цими поверхнями в планетарному масштабі, оскільки це дає можливість перейти до з'ясування ізостатичного стану та імовірного взаємозв'язку ондуляцій рівневої поверхні з найбільшими тектонічними структурами літосфери планет.

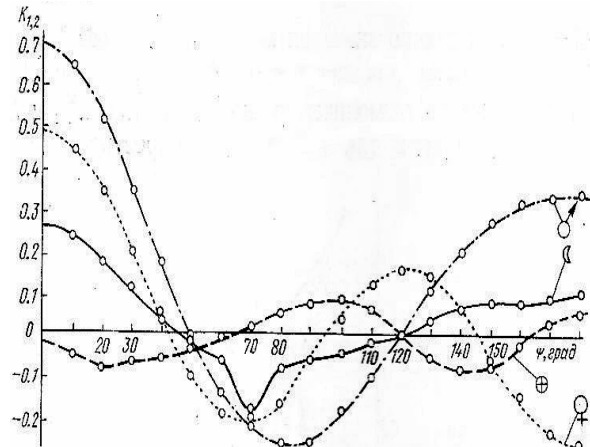


Рис. 3. Взаємні кореляційні функції (ВКФ) висот рельєфу рівневої та фізичної поверхонь планет

З метою виявлення і уточнення взаємозв'язку між рівневою та фізичною поверхнями планети проведемо кореляційний аналіз на основі обчислених ковзних коефіцієнтів кореляції (ККК) за формулами:

$$r = \mu_{11} / \sigma_{h^G} \cdot \sigma_{h^T}, \quad \mu_{11} = \sum_{i=1}^n h_i^G h_i^T / n, \quad (8)$$

$$\sigma_{h^G}^2 = \sum_{i=1}^n (h_i^G)^2 / n, \quad \sigma_{h^T}^2 = \sum_{i=1}^n (h_i^T)^2 / n.$$

Тут h_i^G, h_i^T – відповідно значення висот точок рівневої та фізичної поверхонь планети для центрів "одиничних" трапецій розміром $10^\circ \times 10^\circ$, які обчислені з використанням гармонічних коефіцієнтів моделей гравітаційного поля та топографії планет.

На основі обчислених значень ККК за допомогою ізокорелят (ліній однакових значень r) побудовані карти кореляційного зв'язку між висотами рівневої та фізичної поверхонь планети, які обчислені з урахуванням гармонік до 2-го і вищих порядків. Оскільки гармоніки 2-го порядку відображають глобальні риси (триосної) гравітаційної і геометричної фігур планети, то за ККК з'являється можливість виявити взаємне розташування цих фігур, а також простежити тенденцію зміни ККК між висотами рівневої і фізичної поверхонь, які визначені за гармоніками вищих порядків. Але перш ніж перейти до інтерпретації отриманих результатів, наведемо декілька попередніх зауважень, які стосуються проведеного в цій роботі кореляційного аналізу.

1. Радіус зони ковзання вибирають на підставі таких міркувань: він повинен бути достатньо великим, щоб отримувана оцінка ковзного коефіцієнта кореляції або дисперсії була обґрунтованою, і достатньо малим, щоб давати локальну оцінку. Попередній аналіз показав: якщо вивче-

ність досліджуваного поля висот не перевищує 40 %, то зона ковзання (максимальна довжина сторони квадрата) повинна охоплювати 11–13 трапецій, тоді як при вивченості поля висот до 94 % достатньо вибрати зону ковзання із 3-х трапецій. У нашому випадку 100 % вивченість поля висот рівневої і фізичної поверхонь, тому встановлюється зона ковзання, розмір якої є таким, що дорівнює трьом. Отже кількість трапецій, за якими обчислюються відповідні статистичні характеристики, для центральної зони загалом дорівнює дев'яти і шести для полярних областей.

2. Оскільки ми виконуємо обчислення в центрах трапецій картографічної сітки, то ми маємо справу з неадекватними даними через нерівномірності цих трапецій. Так, наприклад, у полярних областях вони мають вигляд трикутників, а в екваторіальних – трапецій.

3. Вихідні поля висот рівневої і фізичної поверхонь отримуємо за допомогою розкладу за кульовими функціями певного порядку, які недостатньо репрезентативні для виявлення локальних особливостей гравітаційного поля та топографії планети (зокрема, масконів для Місяця).

4. Прості схеми ізостазії по Ері і Пратту допускають наявність ущільнених мас у районах із значними позитивними амплітудами рівневої поверхні і менш щільних утворень – у районах, що характеризуються негативними формами рельєфу. Це означає, що над ізостатично зрівноваженими континентами рівнева поверхня повинна “провалитись”, тоді як для океанічних районів картина буде зворотною. Зважаючи на ці передумови, перейдемо до фізичної інтерпретації одержаних результатів.

Кореляційний аналіз для планети Земля

Порівнюючи сучасну карту геоїда (рис. 4, а) з топографічною поверхнею (рис. 4, б), робимо широко відомий висновок про відсутність зв'язку висот геоїда з тектонічними структурами.

Висоти геоїда виявляють абсолютно незалежний розподіл навіть відносно найкрупніших тектонічних структур літосфери – континентальних виступів і океанічних западин. Це видима відсутність взаємозв'язку висот геоїда з будовою літосфери, вочевидь, зумовлена тим, що вони є інтегрованим результатом статистичної дії на гравітаційне поле Землі неоднорідностей мас, які відрізняються масштабом, глибиною залягання і знаком. Інтегральна дія неоднорідних мас на гравітаційне поле приводить до появи складної інтерференційної картини, що віддзеркалилась на картах геоїда. Тому дослідження характеру взаємозв'язку ондуляцій геоїда з тектонічними структурами літосфери необхідно проводити з урахуванням цієї інтеграції.

Найчіткіші та найдостовірніші взаємовідношення висот геоїда з топографією можуть бути отримані за допомогою так званих залишкових геоїдів, які можна обчислити шляхом поступового виключення з висот (істинного) геоїда висот, які пов'язані з неоднорідностями мас різних рівнів, що складають планету (наприклад, послідовне вилучення впливу неоднорідностей кори, літосфери, мантії). Але ця процедура розділення гравітаційного поля є досить невизначеною та складною у сенсі збирання та інтерпретації даних і тому тут її не використовували.

Аналіз карт кореляційного зв'язку висот геоїда з топографією для Землі виявляє великий розкид значень ККК на поверхні планети. Однак загалом можна зазначити, що основна частина континентальних виступів характеризується зворотною формою кореляційного зв'язку висот залишкового геоїда і рельєфу. Для океанів однаково характерний як зворотний, так і прямий зв'язок. Найбільші значення ККК притаманні окраїнам континентів і океанів, тобто місцям, які відрізняються найбільшою контрастністю висот рельєфу та структурою земної кори.

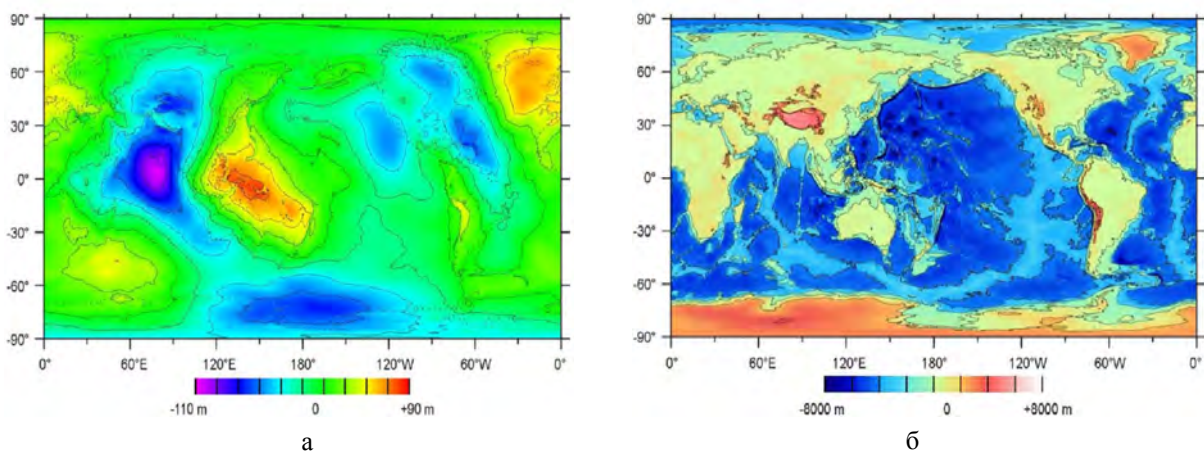


Рис. 4. Висоти геоїда (а), обчислені відносно референцного еліпсоїда WGS84 з використанням коефіцієнтів моделі EGM96 [NGA/NASA EGM96] та висоти топографічної поверхні Землі (б) [SRTM: Earth topography model]

Розглянемо докладніше кореляційну залежність між полями висот рельєфу рівневої та фізичної поверхні для Землі. На рис. 5, а подано карту розподілу ККК, яка характеризує взаємний зв'язок між довгохвильовими особливостями геометричної і гравітаційної фігур планети. Виявляється переважання негативних значень ККК і їх симетричне розташування відносно перетину по дузі великого круга, нахиленого до екватора. Ця особливість розподілу ККК може означати, що взаємне розташування фігур, які апроксимують поверхню літосфери і геоїда, не подібне. Отже, можна припустити, що хвиля планетарного масштабу, яка характеризує триосну геометричну фігуру Землі, ізо статично компенсується, а хвиля, що відображає триосний геоїд, жодним чином не пов'язана з рельєфом земної поверхні, а зумовлена глибинними неоднорідностями у тілі планети. Проте, заслуговує уваги й інше тлумачення відсутності прямої кореляції між полями висот згладженого рельєфу рівневої та фізичної поверхонь Землі. Суть його полягає в неподібному розміщенні планетарних особливостей поверхні літосфери відносно фігури геоїда, що може бути викликано або гравітаційним сповзанням, або переміщенням літосферних плит. Перше припущення пов'язане зі зміною товщини кори у полі сили тяжіння і, відповідно, з додатковою потенційною енергією. Внаслідок цього кора прагне розтікатись по латералі, щоб зменшити неоднорідну товщину і зменшити до мінімуму потенційну енергію. Останнє припущення може приводити до обертання всієї літосфери Землі відносно стійкішої рівневої фігури, що відобразилося на відмінності значень параметрів і на орієнтуванні фігур, що апроксимують поверхню літосфери і геоїда. В обох випадках, імовірно, відбувається зміщення верхньої оболонки Землі, але механізм цього процесу різний – це гравітаційне сповзання і мантийна конвекція.

У разі детальнішого дослідження розподілу ККК на поверхні Землі (рис. 5, б) виявляється

значна асиметрія в ізо статичній компенсації південної і північної півкулі. Так, оцінки середнього значення ККК для південних материків дають: $r = 0,66$ – для Антарктиди і приблизно $r = 0,47$ – для Африканського континенту. Водночас для континентів північної півкулі спостерігається істотно негативна кореляція: приблизно $r = -0,80$ для Азії та Північної Америки.

Практично для всієї території Атлантичного океану, за винятком Мексиканської затоки, Північно-Американської котловини з територією Бермудських і Ньюфаундлендських островів, ККК набувають істотно негативного значення. Велику частину Тихого океану займають позитивні ізокореляти, але в центрі його знаходиться область негативних значень ККК з екстремумом – 0,69. За околицями Тихоокеанського вогняного кільця, тобто у перехідних зонах, помітна кореляція відсутня. Кореляція в північній половині Індійського океану істотно позитивна, а в його південній половині – негативна. Це вказує на ізо статичну рівновагу у південній частині і помітне порушення ізо статичної компенсації – в північній. Для Північного Льодовитого океану характерні низькі негативні значення ККК. Для континентів південної півкулі (Антарктиди, Австралії, Південної Америки) виявляється прямий кореляційний зв'язок між висотами рельєфу фізичної поверхні і ондуляціями геоїда, а для північних континентів цей зв'язок зворотний. Також для всієї території Атлантичного океану ККК набувають істотно негативних значень.

Враховуючи значення ККК і їх розподіл на земній поверхні, простежується відсутність прямої кореляційної залежності між ондуляціями геоїда і великомасштабними тектонічними структурами літосфери – континентальними виступами і океанічними западинами. Це може бути пояснено ізо статичною компенсацією топографічних мас, або існуванням глибинних неоднорідностей, що не корелюють з топографією.

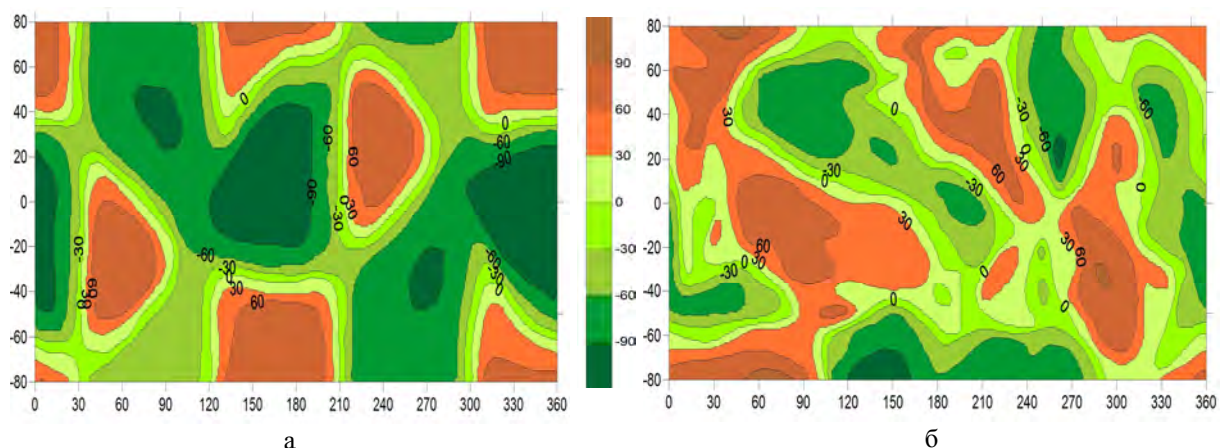


Рис. 5. Розподіл ковзних коефіцієнтів кореляції (ККК) між висотами рівневої і фізичної поверхонь Землі: а – з урахуванням гармонік до 2-го порядку; б – з урахуванням гармонік до 16-го порядку. Ізокореляти проведені через 30 %

Наявність слабкої прямої форми зв'язку у західній частині Тихого океану (див. рис. 5, б) може вказувати на те, що в областях інтенсивного розвитку вулканізму велике значення має процес переміщення речовини по латералі з глибоководних западин під вулканічні утворення. Аномальні маси, які пов'язані з цими переміщеннями речовини, визначально впливають на характер ондуляцій геоїда і викликають цим появу прямої форми зв'язку або зниження величини негативних значень ККК. Зазвичай, джерелами геодинамічних процесів, які можуть впливати на розподіл ондуляцій геоїда, вважаються фізико-хімічні переходи, що відбуваються в астеносфері, зонах фазових переходів або конвекція мантії.

Кореляційний аналіз для планети Венера

На противагу Землі для Венери переважає додатна кореляція між висотами рельєфу рівневої (рис. 6, а) і фізичної (рис. 6, б) поверхонь.

На рис. 7, а наведено картосхему ККК, які розраховані на основі висот рельєфу досліджуваних поверхонь з урахуванням гармонічних коефіцієнтів до 2-го порядку. На основі розподілу значень ККК можна показати, що просторове розташування довгохвильових особливостей геометричної і гравітаційної фігур, які характеризують їх триосність, збігається. Приблизно така сама картина зміни значень ККК зберігається і на рис. 7, б. Тут ККК розраховувалися на підставі висот рівневої і фізичної поверхонь Венери з використанням коефіцієнтів до 6-го порядку.

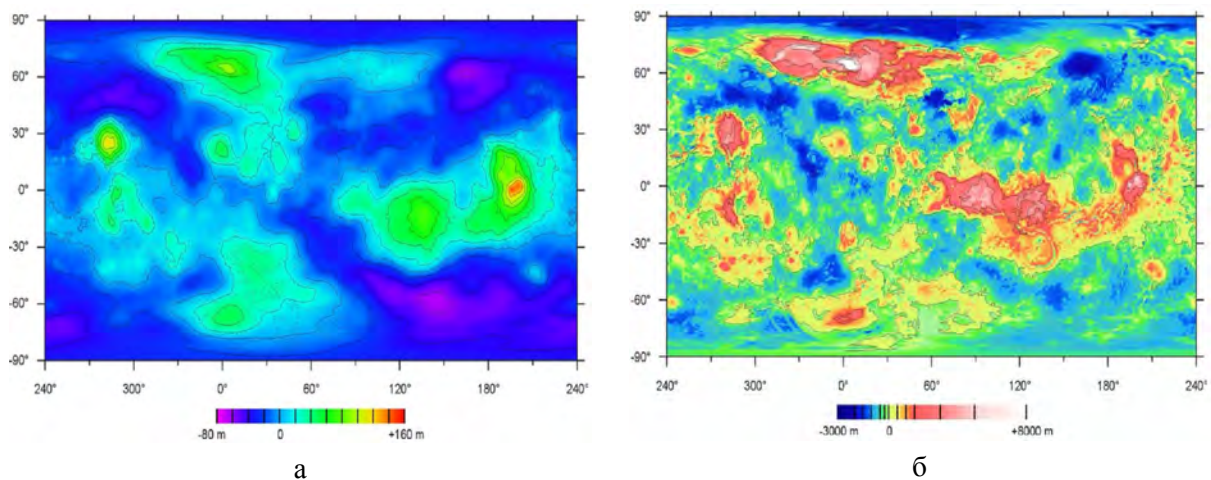


Рис. 6. Висоти геоїда Венери (а), обчислені відносно середнього радіуса 6051,0 км з використанням коефіцієнтів моделі MGNP180U [Konopliv et al., 1999] та висоти топографічної поверхні Венери (б), обчислені відносно середнього радіуса 6051,88 км з використанням коефіцієнтів моделі GTDR3.2 [GTDR3.2: Venus topography]

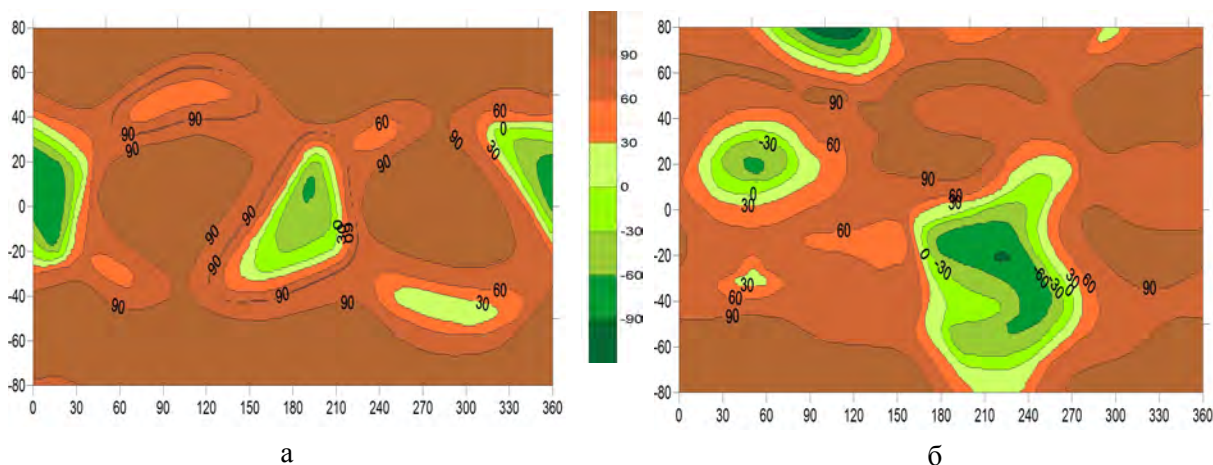


Рис. 7. Розподіл ковзних коефіцієнтів кореляції (ККК) між висотами рівневої і фізичної поверхонь Венери: а – з урахуванням гармонік до 2-го порядку; б – з урахуванням гармонік до 6-го порядку. Ізокореляти проведені через 30 %

Отже, для Венери переважає додатна кореляційна залежність між висотами досліджуваних поверхонь. Проте зазначимо, що для Венери ККК розраховувалися за даними згладжених полів висот рельєфу рівневої та фізичної поверхонь планети. Можливо, високочастотні складові гравітаційного поля і топографії Венери, що, поза сумнівом, матимуть свої характерні особливості, не покажуть такої значущої кореляції.

Кореляційний аналіз для планети Марс

Аналіз карт висот ареоїда (рис. 8, а) з топографією (рис. 8, б) Марса візуально показує їх тісний кореляційний зв'язок. Розглянемо тепер кількісний характер зміни ККК для Марса (рис. 9, а). Звертає на себе увагу додатна кореляція між висотами рельєфу рівневої і фізичної поверхонь для цієї планети, що винятково переважає. Наявність такої тісної кореляційної залежності, особливо між висотами рельєфу цих поверхонь, які отримані за гармоніками 2-го порядку, вказує на те, що довгохвильові особливості гравітаційної і геометричної фігур планети, на протипагу Землі, достатньо подібні у

просторовому розміщенні. Врахування гармонік вищих порядків при визначенні висот рельєфу рівневої і фізичної поверхонь Марса приводить до іншого розподілу значень ККК (рис. 9, б). Західна півкуля характеризується істотно додатними значеннями ККК, а для східної півкулі додатна кореляція простежується в області, діаметрально протилежній структурі Tharsis. У зв'язку з цим можна припустити, що виявлена кореляційна залежність між висотами рельєфу рівневої і фізичної поверхонь Марса свідчить про динамічні процеси, що перебігають у глибинній мантії, які вплинули на формування марсіанської поверхні і відповідним чином відобразилися у гравітаційному полі планети. Отже, регіони з додатними значеннями ККК імовірно динамічно були пов'язані з виникненням структури Tharsis і зараз їх топографія або лише частково ізостатично компенсована, або корелює з аномаліями густини у верхній мантії. Перше припущення повинне приводити до значного надгідростатичного напруження, що припускає існування товстої літосфери, друге, очевидно, є ймовірнішим.

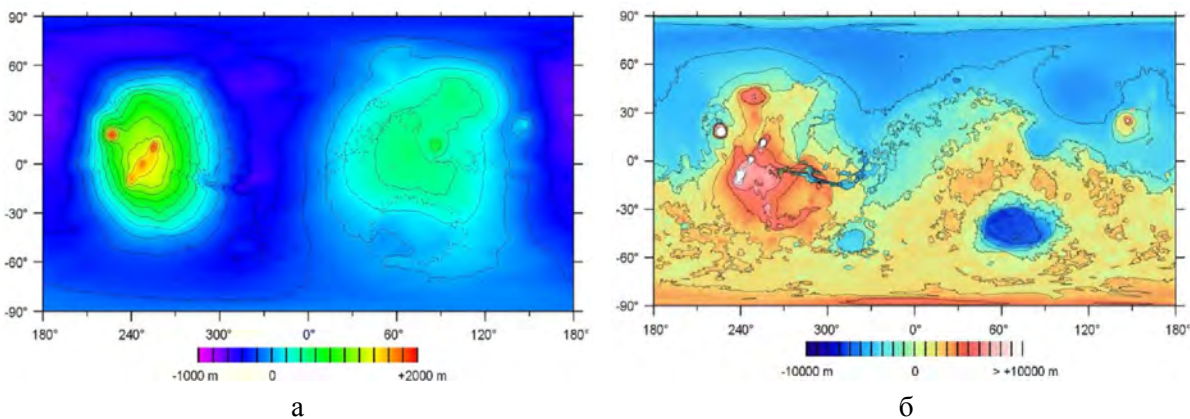


Рис. 8. Висоти ареоїда (а), обчислені з використанням коефіцієнтів до 90-го порядку і степеня моделі GMM-2В відносно референцного еліпсоїда з екваторіальним радіусом 3397,0 км і полярним стисненням 1/191,20 [Lemoine et al., 2001] та висоти топографічної поверхні Марса (б), обчислені відносно референцного ареоїда з використанням коефіцієнтів до 90-го порядку і степеня моделі Mars2000 [Smith et al., 2001]

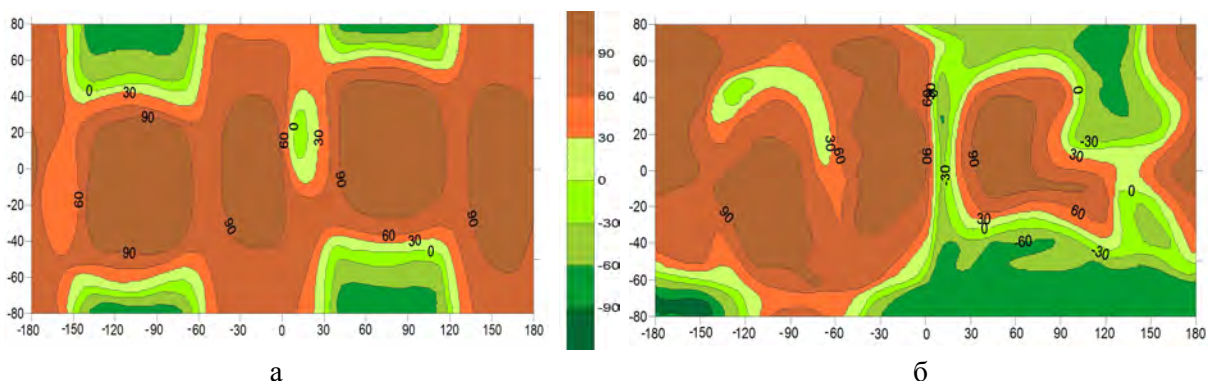


Рис. 9. Розподіл ковзних коефіцієнтів кореляції (ККК) між висотами рівневої та фізичної поверхонь Марса: а – з урахуванням гармонік до 2-го порядку; б – з урахуванням гармонік до 6-го порядку. Ізокореляти проведені через 30 %

Кореляційний аналіз для Місяця

Беручи до уваги карти висот селеноїда і топографічної поверхні, наведені на рис. 10, можна спостерігати додатну кореляцію в екваторіальній області для регіонів, які обмежені довготами 90°W – 180° W і 120°E – 180° E. Від’ємна кореляція охоплює екваторіальну область, обмежену довготами 60°W – 60°E. Але отримані ККК для Місяця не володіють таким ступенем довіри, як для інших планет. Проте на рис. 11, а чітко просліджується цікава особливість у розподілі ККК між

висотами рельєфу рівневої та фізичної поверхонь Місяця, які обчислені за гармоніками 2-го порядку, а саме наявність на фоні додатних значень ККК значущої від’ємної кореляції в екваторіальній області поблизу нульового меридіану. Цю кореляційну залежність можна пояснити гравітаційною дією на рівневу поверхню масконів, що знаходяться в цій області. Рис. 11, б показує мозаїчну картину зміни додатних і від’ємних значень ККК, одержаних на основі висот порівнюваних поверхонь з урахуванням гармонік до 12-го порядку.

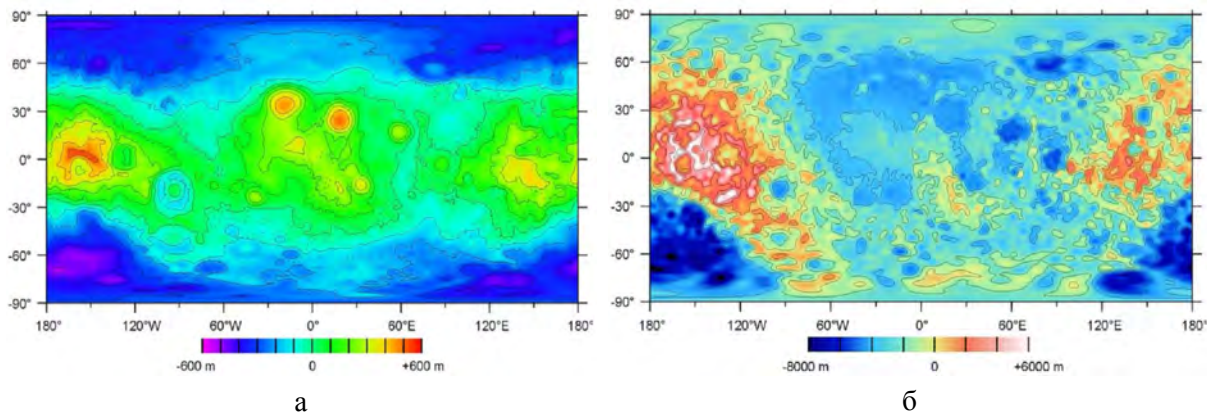


Рис. 10. Висоти селеноїда (а), обчислені відносно середнього радіуса 1738,0 км з використанням коефіцієнтів до 130-го порядку і степеня моделі LP165Q [Konopliv et al., 2001] та висоти топографічної поверхні Місяця (б), обчислені відносно середнього радіуса 1738,0 км з використанням коефіцієнтів до 90-го порядку і степеня (в полярних регіонах до 70-го порядку) моделі MoonUSGS359 [Smith et al., 1997]

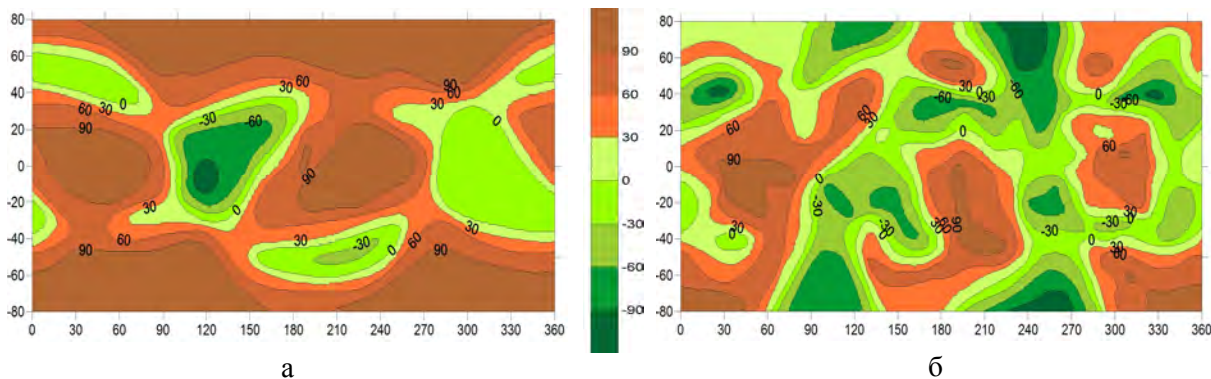


Рис. 11. Розподіл ковзних коефіцієнтів кореляції (ККК) між висотами рівневої та фізичної поверхонь Місяця: а – з урахуванням гармонік до 2-го порядку; б – з урахуванням гармонік до 6-го порядку. Ізокореляти проведені через 30 %

Висновки

Отже, серед досліджених планет земної групи тільки для Землі характерне переважання зворотного кореляційного зв'язку між поверхнями геометричної та гравітаційної фігур, які побудовані з використанням гармонік 2-го порядку. Разом з тим зауважимо, що великомасштабні форми рельєфу фізичних поверхонь Марса, Венери і Місяця впливають на їх гравітаційні фігури більшою мірою, порівняно із Землею, для якої вони жодним чином не виявляються у висотах геоїда. Проте переважно

впливають на глобальні особливості гравітаційного поля Місяця і Марса, так само як і Землі, глибинні неоднорідності. Це підтверджується ще й тим, що отримані методом засічок граничні глибини розташування центрів аномальних мас під найбільшими ізольованими аномаліями сили ваги змінюються для Місяця у межах 150–350 км, для Землі – 600–1500 км [Тараканов, Черевко, 1978], для Марса – 550–700 км [Мещеряков, Церклевич, 1987]. Враховуючи розміри планет, якісна узгодженість наведених оцінок дає підставу

вважати, що планетарні особливості гравітаційного поля Землі, Марса і Місяця зумовлені глибинними аномальними масами. Меншою мірою на аномальне гравітаційне поле Марса та Місяця впливають великомасштабні неоднорідності їх літосфери, які корелюють з рельєфом топографічної поверхні і некомпенсовані в сучасну епоху.

Так, встановлена додатна кореляційна залежність між довгохвильовими висотами рівневої і фізичної поверхонь для Венери, Марса і Місяця підтверджує те, що згладжені хвилі цих поверхонь подібні, а це означає, упродовж їх еволюції значного переміщення поверхневих мас не відбулося. Цей незаперечний факт може слугувати додатковим аргументом на користь того, що літосфера цих планет є доволі жорсткою. Якщо взяти до уваги те, що під час диференціації всі планети знаходилися у частково розплавленому стані, то тоді фігура їх зовнішньої поверхні збігалася з гравітаційною фігурою (враховуючи стан гідростатичної рівноваги). Внаслідок малих розмірів Місяця і Марса процеси еволюційного розвитку відбулися порівняно швидко і їх охолодження привело до того, що загальна картина розміщення згладжених хвиль рівневої і фізичної поверхонь помітно не змінилася. Венера, мабуть, також має жорстку літосферу, яка підтримує топографічний рельєф планети у незмінному стані, якщо інтерпретувати значущу додатну кореляційну залежність за аналогією з Марсом та Місяцем, хоча температура на поверхні планети є доволі високою. Тому вважається, що Венера є тектонічно спокійною планетою, на якій, імовірно, немає тектоніки плит (див. Аргументи, наведені в оглядовій статті [Церклевич, 2009]). Для Землі внаслідок дії конвекції на літосферні плити відбувається весь час їх переорієнтація відносно геоїда. На сучасному етапі геологічної історії великомасштабні форми рельєфу фізичної поверхні не збігаються з довгохвильовими впадинами і підняттями геоїда, що виділяє Землю з інших планет земної групи.

Література

- Бородин В.А., Степаньянц В.А., Шишов В.А. Построение модели поверхности Венеры и ее использование при обработке радиолокационных наблюдений – М. – 1983. – № 20. – 19 с. (Препринт / АН СССР, Ин-т прикл. математики).
- Мещеряков Г.А., Церклевич А.Л. Гравитационное поле, фигура и внутреннее строение Марса. – К.: Наук. думка, 1987. – 240 с.
- Тараканов Ю.А., Черевко Т.И. Интерпретация крупнейших гравитационных аномалий // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1978. – № 4. – С. 25–42.
- Церклевич А.Л. Изостазия та ізостатичні моделі інтерпретації гравітаційного поля планет земної групи (сучасний стан проблеми) // Геодинаміка. – 2009. – № 1(8). – С. 5–23.
- Balmino G.A., Lambeck K., Kaula W.M. Spherical harmonic analysis of the Earth's topography // *J. Geophys. Res.* – 1973. – 78, № 2. – P. 478–481.
- Balmino G., Moynot B., Vales N. Gravity field model of Mars in spherical harmonics up to degree and order eighteen // *J. Geophys. Res.* – 1982. – 87, № 1. – P. 9735–9746.
- Bills B.G., Ferrari A.J. A harmonic analysis of lunar topography // *Icarus.* – 1977. – 31, № 2. – P. 244–259.
- Bills B.G., Ferrari A.J. Mars topography harmonics and geophysical implications // *J. Geophys. Res.* – 1978. – 83, № B7. – P. 3497–3508.
- Bills B.G., Ferrari A.J. A harmonic analysis of lunar gravity // *J. Geophys. Res.* – 1980. – 85, № 82. – P. 1013–1025.
- GTDR3.2: Venus topography [Електронний ресурс] // http://voir.mit.edu/pub/mg_3003/.
- Konopliv A.S., Yoder C.F., Standish E.M. [et. al.] A global solution for the Mars static and seasonal gravity, Mars orientation, Phobos and Deimos masses, and Mars ephemeris // *Icarus.* – 2006. – 182. – P. 23–50.
- 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 / A.S. Konopliv // *Icarus.* – 1999. – 139. – P. 3–18.
- Lemoine F.G., Smith D.E., Rowlands D.D. [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.
- Lerch F.J. Putney B.H., Wagner C.A. [et. al.] Goddard Earth models for oceanographic applications (GEM 10B and 10C) // *Mar. Geod.* – 1981. – 5, № 2. – P. 145–187.
- NGA: NGA/NASA EGM96, N=M=360 Earth Gravitational Model [Електронний ресурс] // <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/egm96.html>.
- Sjogren W.L. Bills B., Birkeland P. W. [et. al.] Venus gravity anomalies and their correlations // *J. Geophys. Res.* – 1983. – 88, № B2. – P. 1119–1128.
- Smith D.E. Zuber M.T., Neumann G.A. [et al.] Topography of the Moon from the Clementine lidar // *J. Geophys. Res.* – 1997. – 102. – P. 1591–1611
- Smith D.E. Zuber M.T., Solomon S.C. [et al.] The Global Topography of Mars and Implications for Surface Evolution // *Science.* – 1999. – 284. – P. 1495–1503.
- Smith D.E. Zuber M.T., Frey H.V. [et al.] Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment summary after the first year of global mapping of Mars // *J. Geophys. Res.* – 2001. – 106(E10). – P. 23689–23722.
- SRTM: Earth topography model [Електронний ресурс] // <http://srtm.usgs.gov/andftp://e0srp01u.ecc.nasa.gov>.

**КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ И ТОПОГРАФИИ
ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ**

А.Л. Церклевич

Выполнен корреляционный анализ уровенной и физической поверхностей Земли, Венеры, Марса и Луны. Дана интерпретация корреляционных зависимостей между высотами уровенной и физической поверхностей для этих планетных тел. Показано, что крупномасштабные тектонические особенности Марса, Венеры и Луны влияют на их гравитационные фигуры в значительно большей мере, чем в случае Земли, для которой они почти полностью скомпенсированы.

Ключевые слова: корреляционный анализ; скользящие коэффициенты корреляции; высоты уровенной поверхности; гравитационная фигура планеты; изостатическое состояние.

**CORRELATION ANALYSIS OF GRAVITATIONAL FIELD AND TOPOGRAPHY
OF TERRESTRIAL PLANETS**

A.L. Tserklevych

Correlations between the heights of equipotential and physical surface of the Earth, Venus, Mars and the Moon were investigated by the comparative analysis. Physical interpretation of the data obtained was given. It was shown that the large-scale topographic features of the Moon, Mars and Venus affect the gravitational figures of these bodies to a considerably greater extent than the terrestrial ones which are almost completely compensated.

Key words: cross-correlation analysis; sliding coefficients of correlation; height of level surface; gravitational figure of planet; isostatical state.