

УДК 528.2.5;523.3/4

Топографічні поверхні і гравітаційні поля Землі, Місяця і планет земної групи

К. К. Каменський, В. С. Кислюк, Я. С. Яцків

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ

Надійшла до редакції 08.11.00

Обговорюються деякі аспекти методології планетодинаміки. Розглянуто системи координат, що застосовуються в планетній динаміці, наведена класифікація фігур планет. Наведені значення параметрів топографічних і гравітаційних фігур Землі, Місяця і планет земної групи, розглянуто деякі особливості геометричних і динамічних характеристик цих небесних тіл.

ВСТУП

Бурхливе накопичення інформації про Землю, її природний супутник Місяць та інші тіла Сонячної системи, отримуваної за допомогою космічних технічних засобів, поставило на якісно новий рівень дослідження з проблеми походження і еволюції Землі та Сонячної системи в цілому, привело до формування нових напрямків у науці — планетодезії, порівняльної планетології, гео- і планетодинаміки.

Планетодинаміка займається вивченням просторово-часових змін характеристик поверхні і гравітаційного поля планет в їхньому зв'язку з внутрішньою будовою та іншими фізичними умовами і процесами, які призводять до цих змін. Методологія і основні поняття цієї галузі науки ще недостатньо розроблені, а запропоновані різноманітні визначення геометричних і динамічних характеристик планет часто суперечливі. Тому класифікація та порівняльний аналіз наявної інформації про характеристики планет є актуальним завданням.

Статтю підготовлено за матеріалами нашого препринту (К. К. Каменський, В. С. Кислюк, Я. С. Яцків. Геометрические и динамические характеристики Земли, Луны и планет земной груп-

пы. I. Топографические поверхности и гравитационные поля. — Киев, 1988.—21 с.—(Препринт / АН УССР. Ин-т теор. физики; ИТФ-88-86Р). Вона відображає стан проблеми, зокрема побудови моделей поверхонь та гравітаційних полів Землі, Місяця та планет земної групи, кінця 1980-х рр. Тут ми обмежуємось розглядом цих об'єктів Сонячної системи, оскільки поки що лише для них є найповніша інформація стосовно їх геометричних, динамічних і фізичних характеристик. Автори не претендують на детальний аналіз предмету досліджень з динаміки і фізики планет, який міститься в численних оглядах і монографіях [1, 5, 6, 9, 12, 21, 22], але мають на меті підготувати до друку перелік більш сучасних значень геометричних та динамічних параметрів тіл Сонячної системи.

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ

СИСТЕМИ КООРДИНАТ, ЯКІ ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ В ПЛАНЕТОДИНАМІЦІ

Для вивчення поступально-обертового руху планет, просторово-часових змін їх поверхонь, а також прив'язки результатів астрономічних і космічних

спостережень необхідно мати дві основні системи відліку: інерціальну (квазіінерціальну) і систему відліку, зв'язану так чи інакше з досліджуваним небесним тілом. Задання і практична реалізація цих систем відліку є найважливішим завданням астрономії і геодезії, яке традиційно вирішується методом послідовних наближень в міру накопичення спостережного матеріалу і наших знань про рух і будову небесних тіл. Центральне місце при вирішенні цього завдання займає вибір «опорних об'єктів», які служать для задання напрямків осей і початків відліку координат.

Відомі різні реалізації першої основної системи відліку: зоряна, радіоастрономічна та ін. [14]. З 1 січня 1998 р. це ISRS (International Celestial Reference System), яка задається радіоінтерферометричними положеннями 608 позагалактичних радіоджерел. Першою практичною реалізацією цієї системи став каталог HIPPARCOS.

За другу основну систему відліку приймаються різні реалізації планетоцентричних систем координат в залежності від ступеня вивченості даної планети. Наприклад, земна система відліку BTS (1986) реалізується геоцентричними положеннями і рухами вибраної кількості станцій, визначених Міжнародним бюро часу в 1986 р. за вимірами відстаней до ШСЗ і Місяця, а також радіоінтерферометричними спостереженнями радіоджерел [20]. За визначенням ця система задається таким чином, щоб не було обертання її осей і зміщення початку координат відносно середньої зовнішньої поверхні Землі. Для інших, менш вивчених планет, напрямки їхніх осей координат визначаються шляхом задання положення нульового меридіана і північного полюса по відношенню до вибраних точок чи напрямків на планеті (див. табл. 1).

Таблиця 1. Основні напрямки планетоцентричних координат

Планета	Нульовий меридіан	Північний полюс (J2000.0)	
		α_0	δ_0
Меркурій	кратер Хун Кал ($\varphi = 20^\circ$)	281.01°	61.45°
Венера	кратер Єва (область Альфа, $\varphi = -32^\circ$)	272.69°	67.17°
Земля	середня обсерваторія в системі BTS (близька до Гринвіча)	полюс системи BTS (близький до СЮ)	
Місяць	середній напрямок на Землю	полюс Кассіні ($I = 1.542^\circ$)	
Марс	кратер Ері-О ($\varphi = -5.142^\circ$)	317.68°	52.89°

Примітка. СЮ — умовний міжнародний початок

Таблиця 2. Параметри нульових поверхонь для відліку висот*

Планета	Екваторіальний (або середній) радіус (a_e), км	Стиснення
Меркурій	2439	0
Венера	6051	0
Земля	6378.140 6378.137**	0.00335281 0.00335274**
Місяць	1738	0
Марс	3393.4	0.0051865

Примітки:

* — рекомендовані робочою групою МАС/МАГ/ КОСПАР [22];

** — згідно з Геодезичною референц-системою GRS-80 [27]

Крім планетоцентричних систем координат, для розв'язання окремих задач планетодезії і планетодинаміки зручно користуватись планетодезичними і топографічними системами координат. Положення екваторів в цих системах визначаються по відношенню до напрямків нормалей до рівневого еліпсоїда і прямовисної лінії відповідно.

Існують різні можливості вибору «нульової поверхні» для відліку топографічних висот на планетах. Найчастіше за нульову поверхню приймають двовісні еліпсоїди (для тіл з швидким обертанням) і сфери середнього радіуса (для тіл з повільним обертанням). Параметри цих поверхонь наведені в табл. 2. Замість середнього радіуса поверхні іноді користуються медіанним радіусом (ділить поверхню планети навпіл за площею) чи модальним радіусом (радіус, на який припадає найбільша площа згідно з гіпсометричною кривою).

ПРО КЛАСИФІКАЦІЮ ФІГУР ПЛАНЕТ

Будемо розрізняти два основних класи фігур: природні фігури, які задаються дійсними величинами висот поверхні планети, значеннями потенціалу її сили тяжіння, потенціалу притягання та ін., і модельні фігури, побудовані по *a priori* заданих характеристиках поверхні, значеннях потенціалу сили тяжіння тощо. Для описання планет використовуються різні фігури і поверхні: топографічні, рівневі, динамічні, гідростатичні та ін. В основу цієї класифікації покладені фізичні принципи визначення тієї чи іншої фігури планети. Вони зведені в табл. 3. Крім зазначених в табл. 3, широко застосовуються: динамічна фігура (задається моментами інерції планети) і гідростатична фігура (при дотриманні умови гідростатичної рівноваги).

Модельні фігури і поверхні планет в свою чергу

Таблиця 3. Класифікація фігур і поверхонь планет (за фізичним принципом)

Топографічні	Рівневі	Комбіновані*
Гіпсометрична	Потенціалу сили тяжіння і його похідних	Псевдорівневі
Еквівалентна (для Землі)	Потенціалу притягання і його похідних	Псевдо-топографічні
Твердої поверхні (для Землі)		

* Комбінованими будемо називати теоретично побудовані фігури за заданими топографічними, гравітаційними характеристиками, а також за даними про густину планет

можуть бути розділені на підкласи в залежності від ступеня узагальнення:

— Глобальні, які відносяться до всієї планети чи більшої її частини (з характерними розмірами понад 90°). Описуються сферичними гармоніками до 2 порядку $n \leq 2$.

— Регіональні, які відносяться до окремих континентів і океанів, що охоплюють площі з характерними розмірами від 10° до 90° . Описуються сферичними гармоніками $2 \leq n \leq 16$.

— Локальні, які охоплюють площі з розмірами менше 10° . Описуються сферичними гармоніками $n > 16$ або спеціальними функціями.

Глобальними фігурами планет обирають: сферу, сфероїд, тривісний еліпсоїд, кардіоїд та ін. Параметри фігур визначають за результатами вимірювань або за даними теоретичного моделювання.

ДЕЯКІ ВИЗНАЧЕННЯ І ПОЗНАЧЕННЯ

Для аналізу особливостей гравітаційного поля планети прийнято розділяти його на нормальну і аномальну частини. В залежності від поставлених задач нормальним вважають поле однорідного еліпсоїда, гідростатично рівноважної фігури та ін. При цьому аномальний потенціал, як правило, записується у вигляді

$$\Delta U(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[\sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin\varphi) \right] + \frac{1}{2} (\omega R \cos\varphi)^2, \quad (1)$$

де r, φ, λ — геоцентричні координати точки на поверхні планети, GM — планетоцентрична стала, R, ω — середній радіус та кутова швидкість обертання планети відповідно, $\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$ — нормовані

стоксові сталі, \bar{P}_{nm} — нормовані приєднані функції Лежандра.

У виразі (1) пропущені гармонічні члени з $n < 2$, бо гармоніка $n = 0$ визначає планетоцентричну гравітаційну сталу, а гармоніки з $n = 1$ задають положення центра мас відносно початку відліку координат (у випадку планетоцентричної системи координат вони збігаються, тому $C_{10} = C_{11} = S_{11} = 0$).

Першим наближенням фігури рідкої планети служить фігура, яка встановлюється при припущенні гідростатичної рівноваги сил притягання і доцентрової сили. Рівнева поверхня потенціалу сили тяжіння, яка є сумою потенціалів притягання і відцентрової сили, називається планетоїдом (геоїдом, селеноїдом та ін.). Відцентровий потенціал (другий член у виразі (1)) записується у вигляді

$$\frac{1}{2} (\omega R \cos\varphi)^2 = \frac{R^4 q}{3a_e^3} [1 - P_{20}(\sin\varphi)], \quad (2)$$

де $P_{20}(\sin\varphi) = 3/2 \sin^2\varphi - 1$, a_e — екваторіальний радіус планети, $q = a_e^3 \omega^2 / GM$ — малий параметр теорії фігури планети.

Крім того, введемо такі додаткові позначення основних характеристик гравітаційної і топографічної фігур планет: W — значення потенціалу сили тяжіння, a_e і α — екваторіальний радіус і стиснення тривісного еліпсоїда, a і λ_a — значення найбільшої півосі тривісного еліпсоїда та її довгота; φ_c і λ_c — широта і довгота напрямку найменшої півосі тривісного еліпсоїда, α_e і α_p — екваторіальне і полярне стиснення тривісного еліпсоїда, x_0, y_0, z_0 — координати зміщення центра фігури відносно центра мас, h — висота точки поверхні, ξ, η — відхилення виска у меридіані і першому вертикалі відповідно; Δg — аномалії у вільному повітрі.

Деякі характеристики гравітаційної і топографічної фігур планет земної групи і Місяця наведені в табл. 4—7. Надрядковими індексами w, v, t тут позначені величини, які відносяться відповідно до фігур потенціалу сили тяжіння, потенціалу притягання і топографічної фігури планети. Дані таблиць отримані з використанням гравітаційних полів і топографії Землі [30, 31], Місяця [3, 18, 24], Марса [15, 17], Венери [19, 28] і Меркурія [32]. Табл. 4 розрахована за наближеною методикою [8] в комбінації з методикою [6].

Наведені в табл. 4—6 оцінки отримані за матеріалами спостережень, які значною мірою відрізняються обсягом, якістю та інформативністю для різних планет. Тим не менше їхній порівняльний аналіз дозволяє зробити ряд планетодинамічних висновків.

Таблиця 4. Характеристики фігур потенціалу сили тяжіння

Планета	$\frac{GM}{10^9 \text{ м}^3/\text{с}^2}$	$q, 10^{-6}$	$W, \text{ м}^2/\text{с}^2$	$R^w, \text{ м}$	$a_e^w, \text{ м}$	$a^w, \text{ м}$	$1/\alpha^w$	$1/\alpha_p^w$	$1/\alpha_e^w$	$\lambda_a^w, \text{ град}$
Меркурій*	22032.09	1.01283	9033950	2438999	2439074	2439147	11049	8333	16700	0 E
Венера	324858.15	0.0610887	53682714	6051448	6051462	6051473	145606	113114	253445	353.9 E
Земля	398600.448	3461.181	62636894	6363668.4	6378137.2	6378172.1	298.257	297.776	91870.88	345.0841 E
Місяць	4902.799	7.588976	2821645	1737570	1737758	1737874	3253.12	2672.26	7486.40	0.0258 E
Марс	42828.44	4597.553	12653733	3384648	3395847	3396490	191.310	184.306	2638.344	104.9 W

* Для Меркурія відомі лише коефіцієнти C_{20} і C_{22}

Таблиця 5. Характеристики фігур потенціалу притягання

Планета	$a_e^v, \text{ м}$	$1/\alpha^v$	$a^v, \text{ м}$	$1/\alpha_p^v$	$1/\alpha_e^v$	$\lambda_a^v, \text{ град}$	$\varphi_c^v, \text{ град}$	$\lambda_c^v, \text{ град}$
Меркурій	2439073	11110	2439150	8334	16667	0 E	90 N	0 E
Венера	6051562	146254	6051473	113505	253448	353.9 E	87.2 N	56.6 E
Земля	6377311	653.431	6377861	617.800	91786.365	345.0737 E	89.9978 N	70.97887 E
Місяць	1737756	3293.8	1737872	2699.7	7486.4	0.02585 E	89.9861 N	1.0274 E
Марс	3393242	340.492	3393884	319.571	2639.842	104.91 W	90.00 N	0 E

Таблиця 6. Характеристики топографічних фігур

Планета	$R^t, \text{ м}$	$x_0^t, \text{ м}$	$y_0^t, \text{ м}$	$z_0^t, \text{ м}$	$a_e^t, \text{ м}$	$1/\alpha^t$	$a^t, \text{ м}$	$1/\alpha_p^t$	$1/\alpha_e^t$	$\lambda_a^t, \text{ град}$	$\varphi_c^t, \text{ град}$	$\lambda_c^t, \text{ град}$
Венера	6051448	288.7	-173.4	-33.2	6051636	9845.9	6051780	7986.26	21145.10	276.72 E	60.24 N	345.11 E
Земля*	6369586	-707.61	-459.54	-826.36	6376356	314.475	6376915	305.713	5697.400	273.4463 E	88.3667 N	48.0084 E
Місяць**	1737540	-1880	-440	-840	1738085	984.44	1738610	759.22	1655.82	28 E	50 N	344 E
Марс	3389916	-48	1169	-2215	3396830	163.9	3399230	146.931	717.485	108.44 W	87.91 N	128.66 W

* Використана модель еквівалентної топографічної поверхні Землі [30].

** За даними узагальненої системи геометричних і динамічних характеристик Місяця [5].

Таблиця 7. Екстремальні значення виміряних топографічних висот і модельних характеристик гравітаційних полів

Планета	$h_{\text{max}}^t, \text{ м}$	$h_{\text{min}}^t, \text{ м}$	$h_{\text{max}}^w, \text{ м}$	$h_{\text{min}}^w, \text{ м}$	ξ_{max}	ξ_{min}	η_{max}	η_{min}	$\Delta g_{\text{max}}, \text{ мГал}$	$\Delta g_{\text{min}}, \text{ мГал}$
Венера	12000	-4300	76	-71	90"	-55"	16"	-17"	56	-52
Земля	8848	-11034	92	-90	39	-34	33	-45	71	-69
Місяць	6640	-4000	620	-430	330	-320	320	-400	291	-202
Марс	27000	-4500	1285	-812	329	-321	242	-161	704	-445

КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТОПОГРАФІЧНИХ І ГРАВІТАЦІЙНИХ ФІГУР

МЕРКУРІЙ

Дані про геометричні та динамічні характеристики Меркурія отримані головним чином за допомогою АМС «Маринер-10», яка зняла близько половини

поверхні планети. Незначна за обсягом і надійністю інформація була отримана також з наземних радарних і оптичних спостережень. Радіус Меркурія ($R = 2440 \text{ км}$) вперше був виведений на основі спостережень його проходжень по диску Сонця, а маса ($M_M = 0.05327M_E$) визначена зі спостережень збурень з боку планети на орбіту астероїда Ерос. Цьому значенню маси Меркурія відповідає середня густина ($\rho = 5500 \text{ кг/м}^3$). З обробки покриттів АМС «Маринер-10» отримані значення радіуса планети

від 2439.0 до 2439.5 км. Ці дані дозволили оцінити екваторіальний радіус Меркурія ($R = 2439.5 \pm 1.0$ км) і його геометричне стиснення ($\alpha = 2.4 \cdot 10^{-4}$), які майже у 2.7 раза більші від стиснення гравітаційної фігури. Визначені значення основних характеристик гравітаційного поля Меркурія: $GM = 22032.09 \pm 0.91 \text{ м}^3/\text{с}^2$, $C_{20} = (-6 \pm 2) \times 10^{-5}$, $C_{22} = (1 \pm 0.5) \cdot 10^{-5}$ [32], які дали змогу вивести наближені параметри гравітаційної фігури планети (табл. 4, 5).

За результатами фотографічних спостережень Меркурія, виконаних з борту АМС «Маринер-10», побудована мережа опорних точок на поверхні планети, яка містить широти і довготи 1328 об'єктів [23]. В топографічному відношенні Меркурій вивчено гірше, ніж інші планети земної групи, але все ж отримана інформація дозволяє судити про тектонічні процеси на поверхні планети, що нагадує місячну. Ці дані, а також вимірювання, виконані за допомогою радарної альтиметрії в обсерваторії Аресібо [26], показали, що кратери на Меркурії дрібніші місячних кратерів зрівнянних розмірів.

Близько 80 % поверхні Меркурія складають сильно кратеровані території, решта — гладкі рівнини. Типічні коливання висот рельєфу Меркурія складають 3 км (на рівнинах менше 1 км), тоді як в екваторіальній зоні максимальні висоти рельєфу сягають 7 км.

ВЕНЕРА

З 1961 р. ведуться радіолокаційні дослідження Венери, які дали змогу визначити деякі геометричні і динамічні характеристики цієї планети. Проте основним джерелом інформації стали розпочаті в 1962 р. регулярні дослідження Венери за допомогою КА: американських («Маринер-2, -5, -10», «Піонер-Венера-1, -2») і радянських («Венера-7»—«Венера-16»). За допомогою КА «Венера-15» і «Венера-16» отримана рекордна роздільна здатність топографії планети: 1—2 км в плані і близько 30 м по висоті вздовж траси польоту.

Радарні вимірювання Венери дозволили визначити середній радіус планети нижче хмар ($R = 6052$ км). Перші визначення маси планети були виконані з аналізу гравітаційного збурення з боку Венери на орбіти Землі і Меркурія ($M_V = 0.82M_E$). Точніші визначення маси Венери були виконані за допомогою КА серії «Піонер-Венера», згідно з якими маса планети складає $0.8150M_E$, що дає середню густину Венери, яка дорівнює 5240 кг/м^3 .

Аналіз моделей гравітаційного поля Венери [19,

28, 33] свідчить про дві відмінні особливості. По-перше, вісь найбільшого моменту інерції відхилена від осі обертання планети на кілька градусів. По-друге, фігура Венери більшою мірою, ніж фігури інших планет земної групи, відхиляється від стану гідростатичної рівноваги. Гравітаційне поле в приекваторіальній зоні вивчено так детально, що навіть розклад його в ряд за сферичними функціями до 18-го порядку і степеня не може адекватно описати його локальні особливості. Хоча полярні регіони в гравітаційному відношенні вивчені слабше, інформація про них використана в моделі [28].

Тектонічна картина на поверхні Венери досить своєрідна. З аналізу радіолокаційних зображень, отриманих за допомогою КА «Венера-15» і «Венера-16», виділені чотири основні типи структур північної півкулі Венери [2]:

- 1) вулканічні утворення: широкі базальтові рівнини;
- 2) вулканічно-тектонічні утворення: куполоподібні підвищення і кільцеві структури;
- 3) тектонічні дислокації — протяжні хребти і долини з перехресним діагональним та ортогональним рисунком, петле- та дугоподібними структурами;
- 4) ударні кратери.

В екваторіальній зоні Венери переважають додатні форми рельєфу. Тут знаходиться материк — Земля Афродити.

ЗЕМЛЯ

Спектр можливих засобів вивчення фігури фізичної поверхні Землі найширший. Для цієї мети використовуються астрономо-геодезичний, гравіметричний, аерокосмічний, супутникові геометричний і динамічний методи, лазерна локація кутикових відбивачів, встановлених на КА і на поверхні Місяця, радіоінтерферометрія з наддовгими базами, методи космічної астрометрії. Оцінки [10] показують, що наземні геодезичні методи зберігають перевагу при передачі координат точок на відстані до кількох сотень кілометрів, але з часом оптимальні границі їх застосування будуть звужуватись [7]. Для створення глобальних астрономо-геодезичних мереж найперспективнішим є комплексне використання різних космічних методів і засобів. Це справедливо для визначення геопотенціалу. Такі методи, як альтиметрія, лазерна локація, доплерівські спостереження, вимірювання «супутник—супутник» і супутникова градієнтометрія істотно розширяють область високоточних визначень характеристик геопотенціалу на материкові райони [10].

Для відліку висот топографічних поверхонь в різних державах використовуються різні референц-еліпсоїди, які найкращим чином апроксимують територію кожної з країн чи прийняті згідно зі встановленими традиціями. Вони відрізняються масштабом і орієнтацією відносно загальноземного еліпсоїда, за який служить рекомендована Геодезична референц-система GRS 80 [27].

Для безпосереднього визначення висот точок топографічної поверхні класичними методами геодезії використовуються проміжні поверхні відносності: геоїд, квазігеоїд і телуроїд. Таким чином, геодезична висота отримується як сума ортометричної висоти і висоти геоїда над референц-еліпсоїдом або як сума нормальної висоти і висоти квазігеоїда над референц-еліпсоїдом. Другий варіант особливо важливий в геодинамічних вимірюваннях з сантиметровою точністю, оскільки поверхня геоїда строго не визначається [25].

Найповніше гравітаційне поле Землі представлено моделями геопотенціалу в роботах [29, 31] відповідно до 180-го і до 250-го порядку і степеня. Топографічна і еквівалентна поверхні Землі представлені моделями до 180-го порядку [30]. Параметри гравітаційних фігур Землі, отримані з використанням сучасних моделей геопотенціалу, дещо відрізняються між собою з-за відмінності у системах відліку.

Параметри узагальненої топографічної фігури Землі, отримані за моделлю [30], наведені в табл. 6. Під топографічною поверхнею розуміємо поверхню суші і незбурену поверхню озер, морів і океанів. В той же час широко розповсюджене поняття еквівалентної поверхні, висоти якої $h_{\text{equ}}(\varphi, \lambda)$ в материкових районах дорівнюють топографічним висотам $h_{\text{top}}(\varphi, \lambda)$, а в океанічних районах обчислюються за формулою [30]

$$h_{\text{equ}}(\varphi, \lambda) = 0.614h_{\text{top}}(\varphi, \lambda). \quad (3)$$

МІСЯЦЬ

Для вивчення геометричних і динамічних характеристик Місяця широко використовуються як класичні наземні астрометричні спостереження (меридіанні, геліометричні, фотографічні та ін.), так і вимірювання за допомогою космічної техніки, оптична локація кутикових відбивачів, встановлених на місячній поверхні, а також довгобазисна радіоінтерферометрія (ДБРІ) цих об'єктів. Відомо порядка 30 моделей гравітаційного поля Місяця, побудованих на основі вимірювань ШСМ «Луна», «Лунар Орбітер», «Експлорер», субсателітів КК

«Аполлон», лазерної локації і ДБРІ, а також вимірювань променевих прискорень командно-службових модулів КК «Аполлон». Основні відомості про ці моделі містяться в роботах [1, 4, 5].

Найповніше інформація про гравітаційне поле зворотного боку Місяця врахована в моделі [18]. Узгодження гармонічних коефіцієнтів селенопотенціалу 2-го і 3-го порядків за даними практично всіх моделей в рамках узагальненої системи астрономо-геодезичних сталих проведено в роботі [5].

В топографічному відношенні Місяць вивчений не рівномірно. Найповніша і найточніша інформація про місячну гіпсометрію є на частини видимої півкулі Місяця вздовж трас КК серії «Аполлон», найменш точна — в полярних регіонах і на зворотному боці Місяця. Селенодезична і гіпсометрична інформація міститься в більш ніж 20 селенодезичних каталогах [5]. Для описання фігури фізичної поверхні Місяця є декілька моделей [5]. Найгрунтовнішими з них є моделі [3, 16], в яких представлено розклад місячного рельєфа в ряд за сферичними функціями відповідно до 12-го і 16-го порядку і степеня. При побудові цих моделей використані практично всі наявні селенодезичні дані, причому в моделі [3] використані також профілі зворотного боку Місяця, отримані КА «Зонд-8» і «Аполлон-11».

На основі порівняльного аналізу даних про гіпсометрію і гравітаційне поле Місяця побудована узагальнена система геометричних і динамічних характеристик Місяця [5], яка містить параметри тривісного еліпсоїда Місяця, апроксимуючого його геометричну фігуру, гармонічні коефіцієнти селенопотенціалу 2-го і 3-го порядків, головні моменти інерції Місяця, а також величини, які характеризують орієнтацію місячного еліпсоїда інерції.

При порівнянні висот рівневих і гіпсометричних поверхонь Місяця виявлена помітна їх додатна кореляція [13]. Проте значний від'ємний вклад в неї вносять маскони, тому загальний коефіцієнт кореляції виявляється близьким до 0.2. Це означає, що після видалення аномальних особливостей, пов'язаних з масконами, розподіл мас всередині Місяця може виявитись дуже близьким до центрально-симетричного. Про порівняно незначну радіальну неоднорідність Місяця свідчить близькість безрозмірного моменту інерції $C = 0.391$ до значення 0.400 (для однорідного тіла).

МАРС

Геометричні і динамічні характеристики Марса отримані головним чином на основі обробки результатів експериментів, проведених за допомогою ра-

дяньських і американських КА серій «Марс», «Маринер» і «Вікінг». Найповніша модель гравітаційного поля Марса у вигляді розкладу в ряд за сферичними функціями до 18-го порядку і степеня була побудована за даними доплерівських спостережень за рухом КА «Маринер-9», «Вікінг-1» і «Вікінг-2» [15]. При цьому були уточнені як глобальні, так і регіональні особливості гравітаційної фігури Марса з урахуванням існуючої вимірювальної інформації: детальне профілювання проведено лише між широтами від 0°N до 30°N , а полярні області вивчені недостатньо.

В топографічному відношенні детально вивчені лише окремі широтні пояси, тим не менше спільний аналіз стереофотограмметричної зйомки, наземних радіолокаційних спостережень і покрив супутників Марса дозволили побудувати карти і моделі його топографічної поверхні. Згідно з моделлю [17], яка являє собою набір гармонічних коефіцієнтів моделі топографічної поверхні до 18-го порядку і степеня, центр фігури зміщений відносно центра мас на 2.50 ± 0.07 км в напрямку точки з координатами ($62^{\circ} \pm 3^{\circ}$) S і ($272^{\circ} \pm 3^{\circ}$) W.

Цей висновок підтверджується також розрахунками, наведеними у табл. 6. Виконання детальних досліджень утруднено неповним покриттям поверхні Марса високоточною геодезичною інформацією. Проте помітний кореляційний зв'язок топографічних висот з гравітаційним полем Марса і деякі інші особливості його фігури [13] свідчать про те, що основний вклад в гармоніки гравітаційного потенціалу низьких порядків вносять, у першу чергу, особливості гіпсометричної поверхні і лише в другу чергу — горизонтальні неоднорідності густини.

Як видно з табл. 4 і 6, довготи найбільших півосей тривісних гравітаційного і топографічного еліпсоїдів Марса практично збігаються з розташуванням домінуючих тектонічних утворень: вулканно-склепінного підняття Фарсіда і антиподально розташованої долини Еллада. Відмітимо, що для Марса, як і для Землі і Меркурія, положення центрів найбільших гіпсометричних депресій (рівнина Еллада, Тихий Океан і Басейн Спеки) і полюсів найбільших осей тривісних рівневих еліпсоїдів дуже близькі.

ВИСНОВКИ

Аналіз табл. 4—6 показує, що геометричні і динамічні стиснення планет з швидким обертанням (Земля, Марс) на два-три порядки більші, ніж у Місяця, Венери і Меркурія, що обертаються повільно. Відхилення осі обертання Землі, Марса,

Меркурія і Місяця від осі гравітаційної фігури не перевищує 0.001° , тоді як для Венери — декілька градусів.

Можна відмітити ряд закономірностей, пов'язаних, очевидно, з розмірами планет, а також з їхнім розташуванням в Сонячній системі. Зі зменшення маси планети пов'язано збільшення нерегулярності її гравітаційного поля (табл. 7) і збільшення відносного вкладу горизонтальних неоднорідностей густини у порівнянні з радіальними. Чим менша площа планетного тіла, тим менше процентне співвідношення між площами рівнин (океанічних западин — у випадку Землі) і загальною площею поверхні. Чим ближча планета до Сонця, тим меншу площу займають висотні рівні, розташовані вище середнього рівня: на Венері — 40 %, на Землі — 43 %, на Марсі — 53 % [11]. Середні рівні висот південної півкулі Місяця, Венери і Марса систематично вищі середніх рівнів їхніх північних півкуль. З віддаленням від Сонця збільшується перепад висот на планетах: на Венері — 16 км, на Землі — близько 20 км, на Марсі — понад 30 км.

За останні роки ситуація з вивчення топографії та гравітаційних полів Місяця і планет значно змінилась завдяки виконанню низки космічних проектів та експериментів. Аналіз цих даних буде предметом окремої статті.

1. Аким Э. Л., Бажинов В. П., Павлов В. Н., Почукаев В. Н. Поле тяготения Луны и движение ее искусственных спутников. — М.: Машиностроение, 1984.—286 с.
2. Барсуков В. Л., Базилевский А. Т., Кузьмин Н. О. и др. Основные типы структур северного полушария Венеры // Астрон. вестник.—1985.—19, № 1.—С. 3—14.
3. Зазуляк П. М., Зингер В. Е., Кислюк В. С. Представление лунной топографии рядом сферических функций до 16-го порядка // Кинематика и физика небес. тел.—1988.—4, № 3.—С. 68—75.
4. Кислюк В. С. Эллипсоид инерции Луны // Кинематика и физика небес. тел.—1985.—1, № 1.—С. 41—48.
5. Кислюк В. С. Геометрические и динамические характеристики Луны. — Киев: Наук. думка, 1988.—238 с.
6. Машимов М. М. Планетарные теории геодезии. — М.: Недра, 1982.—261 с.
7. Медведев П. П. Методы и результаты спутниковой геодезии. — М.: Изд-во ВИНТИ, 1980.—111 с.—(Итоги науки и техники. Сер. Геодезия и аэросъемка; Т. 16).
8. Мещеряков Г. А. О сфероиде Клеро, обобщающем поверхность Марса // Картографирование Луны и Марса. — М.: Недра, 1978.—С. 28—34.
9. Мещеряков Г. А., Церклевич А. Л. Гравитационное поле, фигура и внутреннее строение Марса. — Киев: Наук. думка, 1987.—240 с.
10. Пеллинен Л. П., Нейман Ю. М. Физическая геодезия. — М.: Изд-во ВИНТИ, 1980.—132 с.—(Итоги науки и техники. Сер. Геодезия и аэросъемка; Т. 18).
11. Родионова Ж. Ф., Дехтярева К. И. Гипсометрические особенности Луны и планет земной группы // Проблемы комплексного исследования Луны. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986.—С. 56—71.

12. Сагитов М. У. Лунная гравиметрия. — М.: Наука, 1979.— 432 с.
13. Церклевич А. Л., Зингер В. Е., Каменский К. К. Сравнительный анализ гравитационной и геометрической фигур планет земной группы // Кинематика и физика небес. тел.—1985.—1, № 6.—С. 29—36.
14. Яцкив Я. С. О состоянии и тенденциях развития астрометрических исследований. I. // Астрометрия и астрофизика.—1983.—Вып. 49.—С. 3—9.
15. Balmino G., Moynot B., Vales N. Gravity field model of Mars in spherical harmonics up to degree and order eighteen // J. Geophys. Res.—1982.—87B, N 12.—P. 9735—9746.
16. Bills B. G., Ferrari A. J. A harmonic analysis of lunar topography // Icarus.—1977.—31.—P. 244—259.
17. Bills B. G., Ferrari A. J. Mars topography harmonics and geophysical implications // J. Geophys. Res.—1978.—83B, N 7.—P. 3497—3508.
18. Bills B. G., Ferrari A. J. A harmonic analysis of lunar gravity // J. Geophys. Res.—1980.—85, N 2.—P. 1013—1025.
19. Bills B. G., Kibrick M. Venus topography: a harmonic analysis // J. Geophys. Res.—1985.—90B, N 1.—P. 827—836.
20. BIN Annual Report for 1986. — Observ. de Paris, BIN, 1987.
21. Bursa M., Sima Z. Dynamic and figure parameters of Venus and Mars // Adv. Space Res.—1985.—5, N 8.—P. 43—46.
22. Davies M., Abalakin V. K., Bursa M., et al. Report of the IAU/IAG/COSPAR working group on cartographic coordinates and rotational elements of the planets and satellites: 1985 // Celest. Mech.—1986.—39.—P. 103—113.
23. Davies M., Batson R. M. Surface coordinates and cartography of Mercury // J. Geophys. Res.—1975.—80, N 17.—P. 2417—2430.
24. Ferrari A. J. Lunar gravity: a harmonic analysis // J. Geophys. Res.—1977.—82.—P. 3065—3084.
25. Groten E. Establishment of frames of reference in four-dimensional geodesy // Allg. Vermess. Nachr.—1982.—89, N 2.—P. 62—69.
26. Harmon J. K., Campbell D. B., Bindschadler D. L., et al. Radar altimetry of Mercury: a preliminary analysis // J. Geophys. Res.—1986.—91, N 1.—P. 385—401.
27. Moritz H. Fundamental geodetic constant // Proc. of the IAG XVII Gen. Assamb. IUGG/IAG. — Canberra, 1979.—34 p.
28. Mottlinger N. A., Sjogren W. L., Bills B. G. Venus gravity: a harmonic analysis and geophysical implications // J. Geophys. Res.—1985.—90.—P. C739—C756.
29. Rapp R. H. The Earth's gravity field to degree and order 180 using SEASAT altimeter data, terrestrial gravity data and other data. — Ohio: The Ohio State University, 1981.—(Rep. Dep. Geod. Sci. Surv. N 322).
30. Rapp R. H. Degree variances of the Earth's potential, topography and its isostatic compensation // Bull. Geod.—1982.—56.—P. 84—94.
31. Rapp R. H., Grus J. V. The representation of the Earth's gravitational potential in a spherical harmonic expansion to degree 250. — Ohio: The Ohio State University, 1986.—P. 1—64.—(Rep. Dep. Geod. Sci. Surv. N 372).
32. Sjogren W. L. Planetary geodesy // Proc. Int. Symp. Figure and dynamics of the Earth, Moon and planets. — Prague, 1987.—Part I.—P. 43—55.
33. Williams B. G., Mottlinger N. A., Panagiotacopoulos N. D. Venus gravity field: Pioneer Venus orbiter navigation results // Icarus.—1983.—56.—P. 578—589.

TOPOGRAPHIC SURFACES AND GRAVITATIONAL FIELDS OF THE EARTH, MOON AND TERRESTRIAL PLANETS

K. K. Kamensky, V. S. Kislyuk, and Ya. S. Yatskiv

Some aspects of the methodology of planetary dynamics are discussed. The reference frames for planetary dynamics are considered and the classification of planetary figures is given. Determinations of the parameters of topographic and gravitational figures of the Earth, the Moon and terrestrial planets are summarized and some peculiarities of geometrical and dynamical characteristics of these celestial bodies are considered.