

## ГЕОДИНАМІЧНА ЕВОЛЮЦІЯ ФІГУРИ ЗЕМЛІ ТА МАРСА

Розглядається вплив підняття Дарвіна в Тихому океані, яке, можливо, існувало в еволюційній історії Землі, на зміну її швидкості обертання і положення полюса. Аналогічні розрахунки виконано для Марса у зв'язку з еволюційним вулканічним підняттям Тарсіс.

**Ключові слова:** геодинамічна еволюція фігури планети; плюмове підняття Дарвіна; марсіанське вулканічне підняття Тарсіс; ротаційний режим планети; момент інерції; зміщення осі обертання планети.

**Вступ**

Серед планет земної групи порівняно швидким є обертальний рух Землі і Марса, які в процесі еволюції, ймовірно, змінювали фігуру і кутову швидкість. Великомасштабна зміна фігури цих планет також, можливо, є результатом зміни їх ротаційного режиму [Тяпкін, Кивелюк, 1982; Мещеряков, Церклевич, 1987]. Обертальний рух Землі та Марса мав різний характер [Манк, Макдональд, 1964; Мещеряков, Церклевич, 1987]. Відповідно до законів небесної механіки швидкість обертання Землі обернено залежить від відстані між Землею і Місяцем. Так, А. Монін [Монін, 1972] вважає, що 1,79 млрд. років тому швидкість обертання Землі була у 5 разів вищою за сучасну при мінімальній відстані Місяця від Землі (2,72 земного радіуса). З того часу, з віддаленням Місяця, обертання Землі сповільнюється і тривалість доби збільшується на 1,7 мс за сторіччя. Швидкість обертання Марса могла також зменшитись через виникнення куполоподібної вулканічної структури Тарсіс (внутрішній фактор) і падіння осколків астероїдного поясу (зовнішній фактор) [Мещеряков, Церклевич, 1987].

Про повільне переміщення магнітних полюсів відомо давно, проте і вісь обертання планети може змінюватися. Як певне підтвердження цього (але досі це ще не стовідсотковий факт) можна розглядати нещодавно висловлене геологами А. Малуфом і Г. Халверсоном [Maloof, Halverson, 2006] припущення про те, що 800 мільйонів років тому відбулося зміщення географічних полюсів Землі. Вони виявили, вивчаючи магнітні корисні копалини у древніх осадових породах норвезького архіпелагу, що північний магнітний полюс тоді змістився відразу на 50 градусів за якісь 20 мільйонів років. А оскільки тектонічні плити рухаються набагато повільніше, це зміщення поверхні (відносно глибин і ядра, де формується магнітне поле) автори роботи пояснюють перебалансуванням земної кулі, тобто порівняно швидкою зміною положення осі обертання. Такий процес може початися після виникнення деякого помітного дисбалансу мас у мантії, наприклад, через зростання супервулкана далеко від екватора. Аналогічна подія могла статись колись і на Марсі через утворення велетенського вулкану Олімп та інших великих вулканів нагір'я Тарсіс.

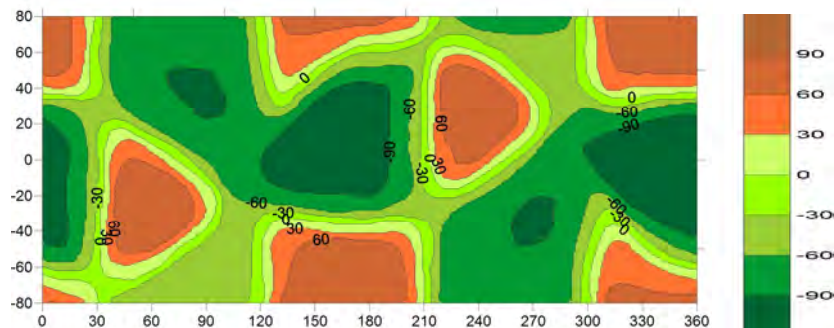
**Постановка проблеми**

Геодинамічну еволюцію фігури Землі і Марса можна розглядати як наслідок процесу перерозподілу їх маси в силовому полі, що динамічно змінюється, з набуттям форми з мінімальною потенціальною енергією. Ці маси перебувають під впливом трьох груп сил: космогенної, ендегенної і екзогенної природи, дія яких приводить до процесів переходу від одного стану рівноваги до іншого. Самі процеси переходу від одного стану до іншого реалізуються в різних часових і просторових масштабах у планетарному полі геодформацій, що динамічно змінюється. Загальне геодформаційне поле формується внаслідок деформації поверхні планети під дією трьох перелічених систем сил і відповідної динамічної реакції, яка супроводжується перерозподілом мас. Залежно від фізико-механічних і геологічних властивостей порід та середовища, величин і масштабів геометричних параметрів, тектонічних форм і тривалості дії сил, цей безперервний процес реакції має певну критичну межу, після досягнення якої фігура планети змінює свою форму. Це приводить до того, що в різних напрямках на її поверхні відбуваються руйнування і утворюються велетенські геологічні розломи.

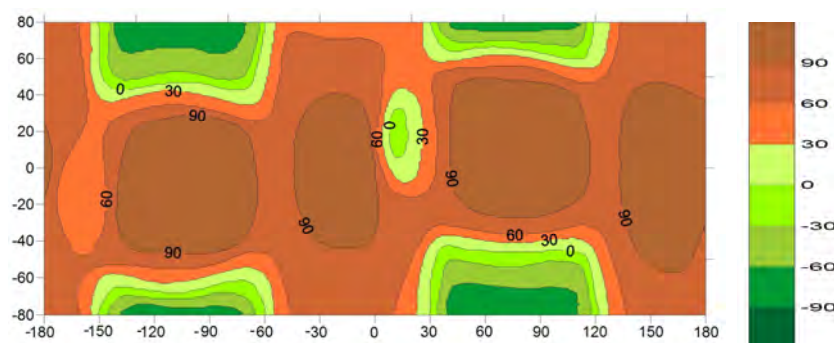
Якщо уявити земну кулю без води, то виявимо, що рельєф земної поверхні істотно відрізняється від геоїда. Порівнюючи карту геоїда з тектонічними картами, доходимо відомого висновку про відсутність зв'язку висот геоїда з тектонічними структурами. Висоти геоїда виявляють абсолютно незалежний розподіл навіть щодо найбільших тектонічних структур літосфери: континентальних виступів і океанічних западин. Ця видима відсутність взаємозв'язку висот геоїда з будовою літосфери, вочевидь, зумовлена негомотетичним розташуванням планетарних структур фізичної поверхні Землі відносно фігури геоїда, що можна пояснити переміщенням літосферних плит, яке може спричинити обертання всієї літосфери Землі відносно стійкішої фігури геоїда. Це, можливо, зумовило відмінності значень параметрів і орієнтування геометричних фігур, що апроксимують фізичну поверхню і геоїд. Як підтвердження цієї гіпотези можна розглядати подану на рис. 1 карту розподілу ковзних коефіцієнтів кореляції (ККК), яка характеризує взаємний зв'язок між довгохвильовими особливостями топографічної і гравітаційної фігур Землі [Церклевич, 2009].

На рис. 1 помітне 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 збігається.

Така нестійкість спричиняє геодинамічний процес досягнення геосферами Землі стану рівноваги, за якого вказані фігури повинні збігатись, а це зумовлює виникнення напружень у літосфері.



**Рис. 1.** Розподіл ковзних коефіцієнтів кореляції (ККК) між висотами рівневої та фізичної поверхонь Землі з урахуванням гармонік до 2-го порядку. Ізокореляти проведено через 30 %



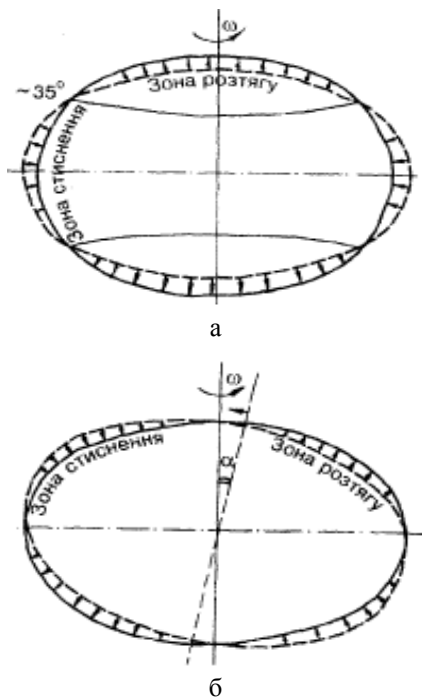
**Рис. 2.** Розподіл ковзних коефіцієнтів кореляції (ККК) між висотами рівневої та фізичної поверхонь Марса з урахуванням гармонік до 2-го порядку. Ізокореляти проведено через 30 %

Для Марса кількісний характер зміни ККК (рис. 2) суттєво інший. Привертає увагу переважання додатної кореляції між висотами рельєфу рівневої і фізичної поверхонь для цієї планети. Наявність такої тісної кореляційної залежності, особливо між висотами рівневої і фізичної поверхонь, побудованих за гармоніками 2-го порядку їх розкладу в ряд за сферичними функціями, вказує на те, що довгохвильові особливості гравітаційної та геометричної фігур планети, на протиположності Землі, гомотетичні в екваторіальній частині. Для північної і південної її частин характерне переважання негативних значень ККК. Якщо розглядати топографічну карту Марса, то вражає насамперед кардинальна відмінність північної та південної півкуль планети і величезний вулканічний район Тарсіс. Можливо, обидві ці особливості – наслідки того самого динамічного процесу, що відбувався на планеті. За дослідженнями планетологів, марсіанська дихотомія існує не менше ніж 4,1 млрд років, тобто з'явилася вже незабаром після утворення Марса як планети Сонячної системи [Мещеряков, Церклевич, 1987]. Північна частина планети – суцільна рівнина, що зрідка перетинається

невисокими горами і вкрита кратерами. Південна частина не менш зрита метеоритними ударами, але куди гористіша, з єдиною низинною рівниною Еллада. В середньому південна півкуля на 4–5 км вища, ніж північна (відносно умовного рівня океану). Товщина кори південної півкулі Марса приблизно на 25 км більша, ніж північної, а різниця в товщині всієї літосфери може бути у 10 разів більшою. Зауважимо також, що літосфера Марса не поділена на плити, як на Землі, але єдина сферична літосфера теж, можливо, зміщувалась. Її міг змістити потік гарячої речовини, що піднявся від ядра і залишив зовні слід у вигляді ланцюга згаслих вулканів у районі Тарсіс. Вік найдавніших структурних елементів Тарсіса геологи оцінюють у 3,7–4 млрд років. Усі згаслі (а може, просто неактивні) вулкани підняття Тарсіс розміщені приблизно вздовж однієї лінії. Такі ланцюжки є і на Землі – наприклад, вулкани Гавайських або Маршаллових островів, і вважається, що вони утворюються на літосферних плитах, під якими є локальний мантіїний потік (плюм) гарячої речовини, що піднімається від ядра планети. Положення плюмових струменів у мантії досить стійке, а плити ковзають над ними.

В результаті вулканічні структури, які утворюють такі потоки, з часом зсуваються до краю плити, що рухається, змінюючи ротаційний режим планети. Такі міркування стали однією з передумов розвитку нової ротаційної гіпотези структуроутворення [Тяпкін, 1998]. На рис. 3 схематично показано виникнення напружень у літосфері планети внаслідок зміни швидкості її обертання і положення осі обертання відносно її фігури.

За одночасної зміни параметрів ротаційного режиму Землі (кутової швидкості та положення осі обертання) через сповільнення обертання Землі виникають напруження у тектоносфері, розподіл яких схематично зображено на рис. 3, а, а зміна положення осі обертання спричиняє лише їх переорієнтування (рис. 3, б).



**Рис. 3.** Схематичний розподіл напружень у літосфері Землі; а – у результаті зміни (зменшення) швидкості обертового руху навколо осі; б – у результаті зміни положення осі обертання

Фактичні геологічні дані свідчать про те, що значну роль у цьому відіграє тектонічний фактор, зумовлений переміщенням полюсів Землі. Такий процес може початися після виникнення деякого помітного дисбалансу мас у корі та в мантії. Наприклад, через зростання супервулкану далеко від екватора. Отже, можна стверджувати, що вертикальні (радіальні) сили порушують осьову симетрію Землі, а горизонтальні сили (за рахунок енергії обертання), що виникають при цьому, відновлюють цю симетрію шляхом відповідного переміщення окремих плит і блоків, а також “квазірідкої” внутрішньої речовини. Цілком можливо, що в цих горизонтальних рухах могли брати

участь і цілі літосферні плити, про що свідчить тектоніка плит, але і їх переміщення повинно відповідати загальній ролі горизонтальних переміщень у відновленні осової симетрії і збереженні моменту кількості обертання. Аналогічна подія, вочевидь, сталася колись на Марсі через утворення велетенського вулкану Олімп та інших великих вулканів нагір'я Тарсіс. Отже, необхідно оцінити вплив тектонічних структур планетарного масштабу, які утворились в процесі геологічної еволюції, на зміну ротаційного режиму планети.

**Виклад матеріалу дослідження**

До найглобальніших тектонічних структур Землі, які, ймовірно, виникли в період ранньої стадії її еволюції після формування літосфери, можна зарахувати западину Тихого океану з реліктовим підняттям Дарвіна, схематично зображену на картосхемі рис. 4 [Менард, 1966]. Народження Дарвініди ознаменувалося небаченим за силою вулканізмом, який охопив зону в 4000 кілометрів завширшки і більше ніж 10000 км завдовжки: “...увесь рельєф південно-західної частини Тихого океану формувався у зв'язку з виникненням підняття Дарвіна”.



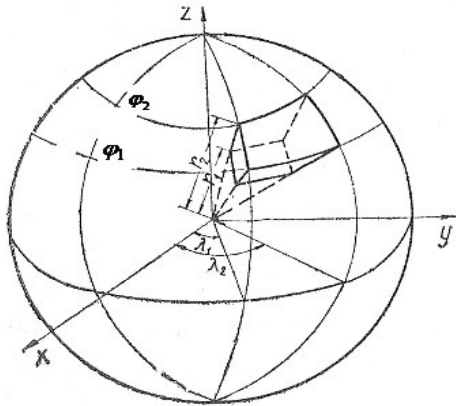
**Рис. 4.** Карта-схема реконструйованого за Г. Менардом [Менард, 1966] підняття Дарвіна в Тихому океані

Глобальний геодинамічний ефект, зумовлений виникненням підняття Дарвіна, кардинально відрізнявся залежно від стадії його розвитку. В період зростання підняття Дарвіна збільшився ефективний радіус Землі і, як наслідок, уповільнилась швидкість її обертання. Це було результатом утворення самого підняття Дарвіна, відносна висота якого над дном Тихого океану становила 2–3 км. І навпаки, руйнування підняття Дарвіна супроводжувалося опусканням дна океану на 1–3 км, масовими базальтовими відкладеннями на його дні, відтоком магматичної речовини під азіатський та американський материки, а також регресією моря, що привело до зменшення радіуса Землі та збільшення швидкості її обертання.

Виконаємо розрахунки впливу зростання і руйнування підняття Дарвіна на величину кутової

швидкості обертання та зміну положення осі обертання Землі. Аналогічні розрахунки проведемо також для оцінки зміни кутової швидкості обертання та положення осі обертання Марса внаслідок утворення вулканічного підняття Тарсіс.

Розглянемо просту механічну модель планети у вигляді кулі радіуса  $R$  однорідної густини  $\delta$ , яка обертається навколо осі  $Z$  (рис. 5). Виділимо з однорідної кулі чотирикутну зрізану піраміду однорідної густини  $\delta$ , обмежену сферичними координатами  $r_1, r_2, \lambda_1, \lambda_2, \varphi_1, \varphi_2$ . Причому в загальному випадку  $r_2 > R$ , хоча можна розглядати варіант, коли  $r_2 < R$ . Зрозуміло, що реальний розподіл густини вздовж радіуса планети суттєво відрізняється від однорідної моделі, а крім того, механізм виникнення та розтікання плюму та утворення вулканічних структур передбачає перенесення мас з глибин мантії до верхніх шарів планети.



**Рис. 5.** Розміщення сферичної чотирикутної зрізаної піраміди однорідної густини виділеного об'єму в тілі планети

Отже, в деякий момент часу, з виникненням вулканічної структури, густина речовини у вирізаній піраміді може змінитися до величини  $\delta'$ , радіус сферичної зовнішньої поверхні зрізаної піраміди  $r_2$  стане більшим, ніж середній радіус кулі  $R$ . Вважатимемо, що маса об'єму піраміди не змінилась, тобто приймаємо умову

$$\delta(R^3 - r_1^3) = \delta'(r_2^3 - r_1^3), \quad (1)$$

враховуючи, що масу в об'ємі піраміди до зміни густин і радіуса поверхні можна обчислити за формулою

$$m = \delta \int_{r_1}^R r^2 dr \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos \varphi d\varphi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda. \quad (2)$$

Зауважимо, що в усіх інших точках сферичної кулі густина залишається незмінною. Однак зміняться моменти інерції відносно осей  $X$  і  $Y$  та відцентровий момент інерції  $I_{XZ}$ , який визнача-

ють для зрізаної сферичної піраміди в кулі радіуса  $R$  з густиною  $\delta$  за формулою

$$I_{XZ} = \int_{r_1}^R \delta X Z r^2 dr \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos \varphi d\varphi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda \quad (3)$$

Після інтегрування формули (3) отримаємо

$$I_{XZ} = \frac{\delta}{15} (R^5 - r_1^5) (\cos^3 \varphi_1 - \cos^3 \varphi_2) \times (\sin \lambda_2 - \sin \lambda_1), \quad (4)$$

де  $X = r \cos \varphi \cos \lambda$ ,  $Z = r \sin \varphi$ .

Новий момент інерції для зрізаної сферичної піраміди з радіусом зовнішньої поверхні  $r_2$  і густиною  $\delta'$  дорівнюватиме

$$I'_{XZ} = \frac{\delta'}{15} (r_2^5 - r_1^5) (\cos^3 \varphi_1 - \cos^3 \varphi_2) \times (\sin \lambda_2 - \sin \lambda_1). \quad (5)$$

Момент інерції відносно осі обертання  $OZ$  для зрізаної сферичної піраміди, вирізаної в кулі радіуса  $R$  з густиною  $\delta$ , подамо у вигляді

$$I_Z = \delta \int_{r_1}^R r^4 dr \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos^3 \varphi d\varphi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda. \quad (6)$$

Відповідно, змінений момент інерції для зрізаної сферичної піраміди з радіусом зовнішньої поверхні  $r_2$  і густиною  $\delta'$  матиме вигляд

$$I'_Z = \delta' \int_{r_1}^{r_2} r^4 dr \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos^3 \varphi d\varphi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda. \quad (7)$$

Момент інерції відносно довільної осі, нахиленої під кутом  $\alpha$  до осі обертання  $Z$ , можна записати так [Машимов, 1982]:

$$I = I_Z \cos^2 \alpha - 2I_{XZ} \cos \alpha \sin \alpha + I_X \sin^2 \alpha. \quad (8)$$

Максимум цього моменту буде за умови

$$\alpha \cong -\frac{\Delta I_{XZ}}{I_Z - I_X} = -\frac{I_Z}{I_Z - I_X} \cdot \frac{\Delta I_{XZ}}{I_Z}. \quad (9)$$

Якщо взяти до уваги такі співвідношення:

$$R - r_1 = H; \quad r_2 - R = h; \quad (10)$$

$$\kappa_1 = (\cos^3 \varphi_1 - \cos^3 \varphi_2) (\sin \lambda_2 - \sin \lambda_1); \quad (11)$$

$$\kappa_2 = (\sin \varphi - \sin \varphi^3 / 3) \Big|_{\varphi_1}^{\varphi_2} (\lambda_2 - \lambda_1); \quad (12)$$

$$\Delta I_{XZ} = I'_{XZ} - I_{XZ}; \quad \Delta I_Z = I'_Z - I_Z; \quad (13)$$

$I_Z = 8/15 \delta \pi R^5$  – момент інерції планети відносно осі обертання;  $(I_Z - I_X)/I_Z = \varepsilon$  – динамічне стиснення планети і співвідношення –  $\Delta I_Z / I_Z = -d\varpi / \varpi$ , яке впливає з закону збереження кількості руху, то отримаємо відповідно відносну величину зміни швидкості

обертання і зміну положення осі обертання планети

$$\frac{d\varpi}{\varpi} = -\frac{30}{8\pi} \kappa_2 \frac{H}{R} \cdot \frac{h}{R}; |\alpha| = \varepsilon \kappa_1 \frac{H}{R} \cdot \frac{h}{R}. \quad (14)$$

Вихідні дані  
та отримані результати для Землі й Марса

Параметри	Структура Дарвіна	Структура Тарсіс
$R$	6371 км	3390 км
$H$	1000 км	1000 км
$h$	2 км	15 км
$\varepsilon$	1/300	1/200
$\varphi_1$	20пн.ш	12N
$\varphi_2$	35пд.ш	106S
$\lambda_1$	155	101W
$\lambda_2$	195	125W
<b>Отримані результати</b>		
$d\varpi/\varpi$	1,1156E-6	6,5734E-07
$\alpha$	475"	262"

Враховуючи формули (14) і дані, наведені в таблиці, виконаємо розрахунки для оцінки зміни швидкості обертання та кута зміни положення осі обертання Землі і Марса.

#### Висновки

Проведені дослідження дають підстави стверджувати, що в процесі еволюції Землі і Марса виникали тектонічні структури планетарного масштабу, які могли суттєво вплинути на їх ротаційні

параметри і фігуру. Зокрема, для Землі реліктове підняття Дарвіна могло змістити полюс до 15 км, а швидкість обертання сповільнити на 0,09 с. Для Марса вулканічне підняття Тарсіс відповідно змінило положення полюса на 6 км і швидкість обертання на 0,06 с. Отримані результати, безумовно, є оцінювальними і їх можна інтерпретувати як імовірний варіант розвитку динамічних процесів на планетах, що можуть приводити до зміни положення осі обертання і, як наслідок, до виникнення напружень і розломних структур.

#### Література

- Манк У., Макдональд Т. Вращения Земли. – М.: Мир, 1964. – 384 с.  
 Машимов М.М. Планетарные теории геодезии. – М.: Недра, 1982. – 261 с.  
 Менард Г.У. Геология дна Тихого океана. – М.: Мир, 1966. – 275 с.  
 Мещеряков Г.А., Церклевич А.Л. Гравитационное поле, фигура и внутреннее строение Марса. – К.: Наук. думка, 1987. – 240 с.  
 Мони́н А.С. Вращение Земли и климат. – Л.: Гидрометеоздат, 1972. – 112 с.  
 Тяткин К.Ф., Кивелюк К.Ф. Изучение разломных структур геолого-геофизическими методами. – М.: Недра, 1982. – 239 с.  
 Церклевич А.Л. Гравітаційне поле і тектоніка планет // Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GPS і GIS – технології. – Львів–Алушта. – 2009. – С. 130–140.  
 Maloof A., Halverson G. Ось вращения Земли в прошлом менялась. – <http://www.membrana.ru/particle/10507> (2006 р.).

### ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ФИГУРЫ ЗЕМЛИ И МАРСА

А.Л. Церклевич, А.С. Заяц

Рассматривается влияние поднятия Дарвина в Тихом океане, которое, возможно, существовало в эволюционной истории Земли, на изменение ее скорости вращения и положение полюса. Аналогичные расчеты выполнены для Марса в связи с эволюционным вулканическим поднятием Тарсис.

**Ключевые слова:** геодинамическая эволюция фигуры планеты; плюмовое поднятие Дарвина; марсианское вулканическое поднятие Тарсис; ротационный режим планеты; момент инерции; смещение оси вращения планеты.

### GEODYNAMIC EVOLUTION OF THE EARTH'S AND MARS FIGURE

A.L. Tserklevych, O.S. Zayats

The influence of the Darwin's elevation in the Pacific Ocean that probably occurred during the evolution history of the Earth and influenced on the rotation rate and location of the pole is considered. Similar calculations are made for Mars due to the volcanic evolution of Tharsis elevation.

**Key words:** geodynamic evolution of the planet's shape; Darwin's plumage elevation; Martian volcanic elevation Tharsis; rotational mode of the planet; moment of the inertia; displacement of the planet rotation axis.