

ФІЗИКА

УДК 521.16

**ОЦІНКА ЗМІНИ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ЗЕМЛІ ВНАСЛІДОК ДІЇ
ПРИПЛИВНОГО ТЕРТЯ З БОКУ МІСЯЦЯ**

Ю. В. Окерешко

студент 1 курсу, група КІ-11, навчально-науковий інститут автоматичної, кібернетики та
обчислювальної техніки

Наукові керівники – к.пед.н., доцент А. В. Рибалко,
старший викладач О. О. Лебедь

*Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне, Україна*

Представлено теоретичну модель зміни кутової швидкості добового обертання Землі внаслідок припливного тертя з боку Місяця. На основі запропонованої моделі здійснено прогнозування еволюції системи Земля-Місяць.

Ключові слова: припливне тертя, добове обертання Землі, віддалення Місяця від Землі.

Представлена теоретическая модель изменения угловой скорости суточного вращения Земли в результате приливного трения со стороны Луны. На основании предлагаемой модели совершенно прогнозирование эволюции системы Земля-Луна.

Ключевые слова: приливное трение, суточное вращение Земли, удаление Луны от Земли.

The theoretical model of angular velocity change of the Earth's daily rotation due to tidal friction by the Moon is shown. The forecast based on proposed model of the evolution of the Earth-Moon system is given.

Keywords: tidal friction, daily rotation of the Earth, the distance of the Moon from Earth.

Вступ. Єдиний природний супутник нашої планети – Місяць – невпинно віддаляється від Землі. За допомогою лазерної локації та інших засобів встановлено, що зараз радіальна швидкість віддалення Місяця становить порядку 3,78 см/рік [1-4]. Причиною цього віддалення є припливне тертя, в результаті якого частина механічної енергії системи Земля – Місяць весь час розсіюється у вигляді тепла, що призводить до поступового зменшення як кутової швидкості обертання Землі навколо своєї осі, так і кутової швидкості обертання Місяця навколо Землі. Кутова швидкість обертання Місяця навколо власної осі на сучасну епоху вже не змінюється, оскільки зараз він весь час повернутий до Землі лише однією стороною.

Аналіз останніх досліджень. Як свідчать шари росту викопних коралів, двостулкових молюсків та водоростей, 2,6 млрд років тому земна доба тривала всього 8,4 години, а середня відстань від Землі до Місяця на ту епоху, згідно розрахунків вчених, становила 23,2 земних радіуса. У більш близький до нас час, коли Місяць був віддалений від Землі на 50 земних радіусів, тривалість земної доби дорівнювала 22,4 години [4].

Факт сповільнення добового обертання нашої планети був передбачений ще у 1695 році Едмундом Галлеєм, який зауважив, що записи більш ранніх літописів про час і місяця сонячних затемнень не збігалися з розрахунковими. Одне з таких затемнень відбулося у Вавилоні 15 квітня 136 року до нашої ери та було описано дуже детально. Воно почалося усього через декілька хвилин після сходу Сонця, що дозволяє досить точно розрахувати

положення Місяця та Сонця. Якщо здійснювати такі розрахунки, вважаючи кутову швидкість обертання Землі незмінною, то виявиться, що в указаний день дійсно повинно було б відбутися затемнення, але спостерігатися воно могло не у Вавилоні, а у смузі, що знаходиться приблизно на 60° західніше. Це означає, що понад 2000 років тому Земля оберталася навколо своєї осі швидше ніж зараз.

Актуальність дослідження. Якщо Земля неухильно зменшує кутову швидкість свого обертання навколо власної осі, то виникає низка запитань: яким буде вплив динаміки сповільнення обертального руху Землі на подальші епохи еволюції системи Земля – Місяць; чи варто турбуватися нашим далеким нащадкам про те, що Місяць загальмує обертання Землі так, що й вона буде повернута до нього лише однією стороною; можливо, у майбутньому Місяць зовсім «відірветься» від Землі та буде «захоплений» гравітацією Сонця тощо?

Тому ми поставили наступні **завдання** дослідження: 1) аналізуючи результати досліджень інших науковців, відшукати рівняння залежності зміни кутової швидкості добового обертання Землі від відстані до Місяця та залежності між радіальною швидкістю віддалення Місяця від відстані до нього; 2) здійснити прогнозування зміни добового обертання Землі та середньої відстані до Місяця відповідно до результатів наших теоретичних досліджень.

Методика досліджень. Теоретичні методи, що ґрунтуються на законах класичної механіки, елементах математичного аналізу, опрацювання наукових джерел інформації.

Результати досліджень. Сповільнення добового обертання нашої планети, згідно законів динаміки обертального руху, спричинене діючим на неї гальмівним моментом. Він виникає за рахунок того, що Земля захоплює за собою припливні горби, оскільки вона обертається швидше, ніж навколо неї обертається Місяць (див. рисунок).

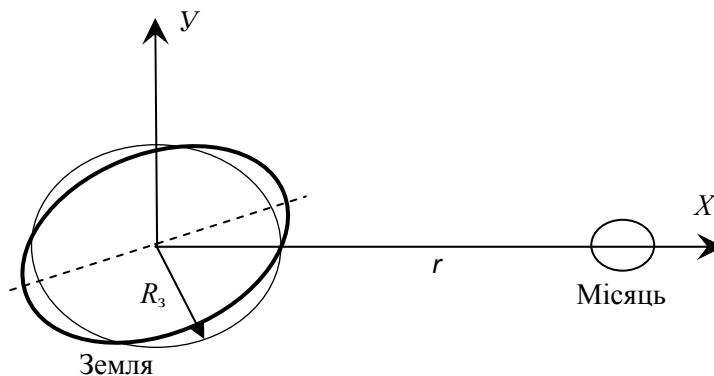


Рисунок. Захоплення Землею припливних горбів унаслідок тертя.

Тому припливні горби знаходяться не на лінії, що сполучає центри Землі та Місяця, а дещо випереджують її. Різниця моментів сил гравітаційної дії Місяця на припливні горби і створює гальмівний обертальний момент.

Згідно досліджень [5], диференціальне рівняння зв'язку елементарної зміни кутової швидкості обертання Землі навколо своєї осі $d\omega_3$ від елементарної зміни середньої відстані до Місяця dr має вигляд

$$I_3 d\omega_3 = -\frac{1}{2} m \sqrt{GM} \cdot r^{-\frac{1}{2}} dr. \quad (1)$$

Враховуючи, що момент інерції Землі дорівнює $I_3 = 0,33MR_3^2$, де M і R_3 – відповідно її маса та радіус [2], останнє рівняння набуде вигляду $0,33MR_3^2 d\omega_3 = -\frac{1}{2}m\sqrt{GM}r^{-\frac{1}{2}}dr$.

Звідки, приймаючи до уваги, що $\frac{GM}{R_3^2} = g$, де g – прискорення вільного падіння біля поверхні нашої планети, одержимо:

$$d\omega_3 = -\frac{m\sqrt{g}}{0,66MR_3}r^{-\frac{1}{2}}dr \quad (2)$$

Інтегрування останнього рівняння дозволить виразити залежність між змінами кутової швидкості обертання Землі та відстані до Місяця.

$$\int_{\omega_0}^{\omega} d\omega_3 = -\frac{m\sqrt{g}}{0,66MR_3} \int_{r_0}^r r^{-\frac{1}{2}} dr \quad \text{або} \quad \omega - \omega_0 = -\frac{m\sqrt{g}}{0,33MR_3} (\sqrt{r} - \sqrt{r_0}), \quad (3)$$

де ω_0 , r_0 – кутова швидкість обертання Землі та її середня відстань до Місяця у початковий момент часу, а ω , r – значення цих величин у довільний момент часу.

Розділивши обидві частини рівняння (1) на нескінченно малий проміжок часу $dt \rightarrow 0$, отримаємо залежність між кутовим прискоренням обертального руху Землі ε_3 від швидкості віддалення Місяця v .

$$I_3 \varepsilon_3 = -\frac{1}{2}m\sqrt{GM}r^{-\frac{1}{2}}v \quad (4)$$

Згідно законів динаміки обертального руху $-I_3 \varepsilon_3 = M_\Gamma$, де M_Γ – гальмівний обертальний момент, що діє на Землю внаслідок припливного тертя. Тому радіальна швидкість руху Місяця дорівнює

$$v = \frac{2M_\Gamma r^{\frac{1}{2}}}{m\sqrt{GM}} \quad (5)$$

Математичний вираз для обчислення значення гальмівного моменту M_Γ вивести досить складно. Проте автори [5-6] за допомогою методу розмірностей фізичних величин вивели залежність M_Γ від середньої відстані між Землею та Місяцем r .

$$v = \frac{b}{\sqrt{r^5}}, \quad (6)$$

де b – константа, значення якої залежить від гравітаційної сталої G , маси Землі M , маси Місяця m , середнього радіуса Землі R_3 .

Обчислимо значення параметра b , згідно (6), скориставшись значеннями v_0 та r_0 на сучасну епоху

$$b = v_0 r_0^{5/2} = \frac{3,78 \cdot 10^{-2}}{3,15 \cdot 10^7} \cdot (60,3 \cdot 6,37 \cdot 10^6)^{5/2} = 3,47 \cdot 10^{12} \text{ (м}^{7/2} \cdot \text{с}^{-1}\text{)}. \quad (7)$$

Оскільки $v = \frac{dr}{dt}$, то вираз (6) можна переписати як диференціальне рівняння $r^{5/2} dr = b dt$, інтегрування якого дозволяє отримати залежність r від t .

$$\int_{r_0}^r r^{5/2} dr = b \int_{t_0}^t dt \Rightarrow \frac{2}{7} (r^{7/2} - r_0^{7/2}) = b(t - t_0). \quad (8)$$

Рівняння (3) дає можливість оцінити відстань від Землі до Місяця, за якої тривалість земної доби зміниться, наприклад, на 1 годину.

$$\frac{r}{r_0} = \left(1 + \frac{0,66\pi MR_3(T - T_0)}{m\sqrt{grTT_0}} \right)^2 \approx 1,016.$$

Отже, згідно нашої теоретичної моделі, тривалість земної доби становитиме $T = 25$ (год), коли середня відстань від Землі до Місяця дорівнюватиме $r = 1,016 \cdot 60,3R_3 = 61,3R_3$.

Вважаючи, що маса припливних горбів за цей час істотно не зміниться ($r \approx r_0$), оцінимо, через який проміжок часу Місяць віддаляться від Землі на таку відстань. Для цього скористаємося виразом (8).

$$\Delta t = \frac{2(r_1^{7/2} - r^{7/2})}{7b} = \frac{2(61,3^{7/2} - 60,3^{7/2})R_3^{7/2}}{7b} = 5,4 \cdot 10^{15} \text{ (с)} = 1,7 \cdot 10^8 \text{ (років)}.$$

Оцінимо середню швидкість віддалення Місяця на ту епоху згідно виразу (5).

$$v = \frac{b}{\sqrt{r^5}} = \frac{3,47 \cdot 10^{12}}{(61,3 \cdot 6,37 \cdot 10^6)^{5/2}} = 1,15 \cdot 10^{-9} \text{ (м/с)} = 3,65 \text{ (см/рік)}.$$

Висновки: 1) зміна кутової швидкості добового обертання Землі та віддалення Місяця на ранніх стадіях еволюції системи Земля-Місяць відбувалися значно інтенсивніше, ніж нині;

2) згідно нашої оцінки, через 170 млн років Місяць віддаляться від Землі на відстань 61,3 радіуса Землі (на сучасну епоху ця відстань становить 60,3 таких радіусів);

3) на ту епоху земна доба триватиме приблизно 25 годин, що лише на 1 годину відрізняється від сучасної;

4) відповідно до запропонованої моделі оцінка радіальної швидкості віддалення Місяця через 170 млн років становитиме 3,65 см/рік (на сучасну епоху це 3,78 см/рік);

5) інтенсивність змін кутової швидкості добового обертання Землі та радіальної швидкості віддалення від неї Місяця з часом згасає. Чим далі буде знаходитися Місяць від Землі тим меншим буде вплив його припливного тертя, а значить і дисипація механічної енергії системи цих небесних тіл;

6) на нашу думку, до завершення терміну стабільності Сонячної системи (4,5 млрд років) гравітаційна дія Місяця не зменшить кутову швидкість добового обертання Землі настільки, щоб вона назавжди повернулася до нього лише однією стороною.

Список використаних джерел:

1. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.eco-live.com.ua/content/blogs/chomu-misyats-viddalyaetsya-vid-zemli>.
2. Бялко А. В. Наша планета – Земля / Бялко А. В. – М. : Наука, 1989. – 236 с.
3. Сборник задач по физике / под ред. Козела С. М. – 2-е изд., испр. – М. : Наука. 1990. – 352 с.
4. Эврика – 87/ сост. А. Лельевр. – М. : Мол. гвардия, 1987 – 316 с.
5. Рибалко А. Технологія організації навчального дослідження учнів – членів МАН на прикладі завдання з астрономії / Рибалко А., Галатюк Ю. // Фізика та астрономія в школі. – 2006. – № 3. – С. 31–35.
6. Методи розв'язування фізичних задач. Метод аналізу розмірностей та принцип подібності / Ю. М. Галатюк, В. Я. Левшенюк, Я. Ф. Левшенюк, А. В. Рибалко, В. І. Тищук. – Х. : Вид. група «Основа», 2008. – 144 с. – (Б-ка журн. «Фізика в школах України»; Вип. 2 (50)).
7. Галатюк Ю. Аналіз розмірностей фізичних величин як засіб розвитку творчих здібностей учнів / Галатюк Ю., Рибалко А. // Нова педагогічна думка. – № 1-2. – Рівне, 2001. – С. 64–72.