

ЗБУРЕННЯ В РУСІ ГЕОСИНХРОННИХ ОБ'ЄКТІВ ПІД ДІЄЮ ТИСКУ СОНЯЧНОЇ РАДІАЦІЇ

І.Л. Ламер

Кафедра оптики. Лабораторія космічних досліджень

Досліджено коротко- і довгоперіодичні зміни прискорення геосинхронних супутників і елементів орбіт під дією сонячного випромінювання за 10 супутниками з російського каталогу. Знайдені основні гармоніки цих змін.

Для обчислення вектора прискорення геосинхронного супутника, спричиненого сонячним випромінюванням, користуємось формулою ([1], стор. 68):

$$\vec{a} = -\gamma_1 C_R \frac{S}{m} P_0 \frac{r_c^2}{|\vec{r}_c - \vec{r}_{Sp}|^2} \cdot \frac{\vec{r}_c - \vec{r}_{Sp}}{|\vec{r}_c - \vec{r}_{Sp}|} + \frac{S}{m} P_0 \left(\frac{R}{\vec{r}_{Sp}} \right)^2 \cdot (\alpha + \beta \cdot \gamma_2) \cdot \left(\frac{\vec{r}_{Sp}}{r_{Sp}} \right) \quad (1)$$

де $\alpha = 0.25 \cos^2 \varphi$ – величина, що визначає потік інфрачервоного світла від Землі, $\beta = 0.45 \cdot \sin(5/9\pi - \psi)$ – альbedo Землі, $\varphi = \arcsin(z_{Sp} / r_{Sp})$ – широта підсупутникової точки, $\psi = \arccos \{ (x_c \cdot x + y_c \cdot y + z_c \cdot z) / (r_c \cdot r_{Sp}) \}$ – кут між геоцентричним вектором Сонця \vec{r}_c (x_c, y_c, z_c) і супутника \vec{r}_{Sp} (x, y, z) в екваторіальній системі, R – радіус Землі, $P_0 = 0.00000465 \text{ Н/м}^2$ – тиск світла Сонця на супутник. В моделі використовуємо значення аеродинамічного коефіцієнту $C_R = 1.0$. Середнє відношення ефективної площі супутника до його маси S/m для більшості ГО можна брати з російського каталогу [2]. Тіньові функції γ_1 і γ_2 враховують перебування супутника в тіні Землі (γ_1) і дію на супутник відбитого від Землі сонячного випромінювання (γ_2). Приймаємо $\gamma_1 = 1$,

$$\gamma_2 = \begin{cases} 0, & \text{якщо } |\psi| \geq \frac{5}{9}\pi \\ 1, & \text{якщо } |\psi| < \frac{5}{9}\pi \end{cases}.$$

Дослідження проводились за наступною схемою. Були вибрані 10 геосинхронних супутників з різними дрейфами, нахилами орбіти і відношеннями S/m з російського каталогу. За програмою електронної форми російського каталогу [3] обчислювалися орбіти супутників з інтервалом 0.01 доби в інтервалі до 3 років. Далі, за елементами орбіт на кожний момент часу за формулою (1) обчислювали координати прискорення в екваторіальній прямокутній системі координат. Величина прискорення обчислювалася за цими координатами:

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}.$$

На рис. 1 приведені зміни прискорення двох супутників протягом 3 діб (суцільні криві) і гармоніка

$$a = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot MJD}{T} + \phi\right) + a_0$$

зміни a другого супутника (пунктирна крива).

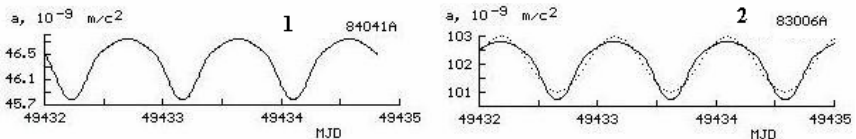


Рис. 1. Короткоперіодичні зміни величини прискорення двох ГС в інтервалі 3 діб і гармоніка зміни a супутника 83006А.

Середнє значення періоду короткоперіодичних змін прискорення $T_{\text{сер}} = 1$ доба. Середні прискорення a_0 і амплітуди за даними 10 супутників пропорційні відношенню S/m . Середнє значення a_0 знаходиться в межах $(10 - 100) \cdot 10^{-9} \text{ м/с}^2$.

Довгоперіодичних змін величина прискорення не має.

Прискорення супутника визначали в орбітальній системі координат (r, v, u) . Початок такої системи знаходиться на супутнику (рис. 2). Вісь r направлена в напрямку геоцентричного вектора $\vec{r}_{Sp}(x, y, z)$, від центра Землі. Вісь v системи лежить в площині орбіти супутника, перпендикулярна осі r , направлена в бік руху супутника. Система осей (r, v, u) утворює праву трійку ортогональних векторів.

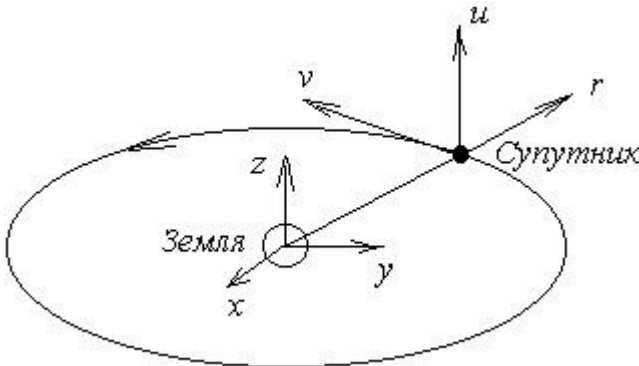


Рис. 2. Орбітальна система координат.

Прискорення a_r, a_v, a_u в напрямку осей r, v, u визначали як проєкції вектора прискорення $\vec{r}_{Sp}(x, y, z)$ на ці осі. В таблиці 1 приведені періоди і амплітуди основних гармонік зміни прискорень a, a_r, a_v, a_u . Гармоніки зміни a_r, a_v відрізняються лише фазами: $\Delta\varphi = 90^\circ$.

Періоди і амплітуди основних гармонік зміни прискорень
 a, a_r, a_v, a_u

	Короткоперіодичні гармоніки		Довгоперіодичні гармоніки	
	Період, діб	$A, \cdot 10^{-9} \text{ м/с}^2$	Період, діб	$A, \cdot 10^{-9} \text{ м/с}^2$
a	~1	0.1 – 1.0	Немає	
a_r	~1	20 – 100	Немає	
a	~1	20 – 100	Немає	
a_u	~1	0.001 – 0.009	365.0 ± 1.9	4 – 35

Амплітуда короткоперіодичних змін a_r, a_v змінюється з періодом ~0,5 року. Причому амплітуда цих змін тим більша, чим менший нахил орбіти супутника i (рис. 3). Максимальні амплітуди – в дні весняного і осіннього рівнодення.

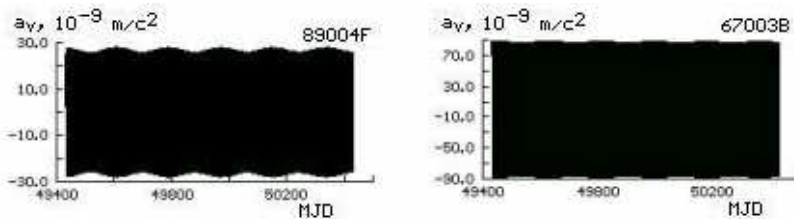


Рис. 3. Зміна прискорення a_v на інтервалі 1000 діб (2,7 років) супутника 89004A ($i = 4,7^\circ$) і супутника 67003B ($i = 11,4^\circ$), починаючи з 21 квітня 1994 року.

Прискорення a_u має довгоперіодичну гармоніку з періодом близько 1 року, зумовлену нахилом екватора відносно екліптики; добова гармоніка дуже слаба (рис.4). Початкова фаза довгоперіодичних гармонік: $\varphi = 10,6^\circ \pm 14,8^\circ$. Амплітуда зміни a_u лінійно залежить від S/m (коэф. корел. $\rho = 0,91$).

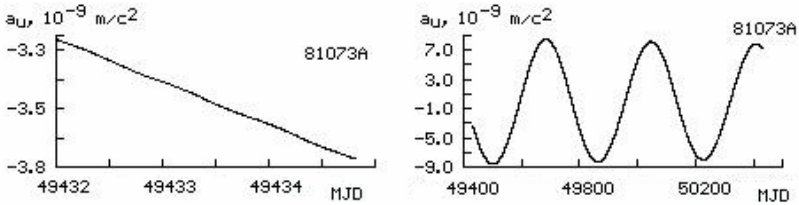


Рис. 4. Зміна прискорення a_u супутника 81073A в інтервалі 3 діб (зліва) і в інтервалі 1000 діб (справа), починаючи з 21 березня 1994 року.

Збурення в елементах орбіт обчислювалися за рівнянням Лагранжа у формі Гауса [1]:

$$\begin{aligned}
 \dot{a} &= \frac{2}{n\sqrt{1-e^2}} \left(e \sin v \cdot K_3 + \frac{p}{r} \cdot K_2 \right), \\
 \dot{e} &= \frac{\sqrt{1-e^2}}{na} (\sin v \cdot K_3 + (\cos E + \cos v) \cdot K_2), \\
 \dot{\omega} &= \frac{\sqrt{1-e^2}}{nae} \left[-\cos v \cdot K_3 + \left(\frac{r}{p} + 1 \right) \sin v \cdot K_2 \right] - \cos i \cdot \frac{d\Omega}{dt}, \\
 \dot{i} &= \frac{1}{na\sqrt{1-e^2}} \cdot \frac{r}{a} \cos(\omega + v) \cdot K_1, \\
 \dot{\Omega} &= \frac{1}{na\sqrt{1-e^2}} \cdot \frac{r}{a} \cdot \frac{\sin(\omega + v)}{\sin i} \cdot K_1, \\
 \dot{M} &= n - \frac{1}{na} \left(\frac{2r}{a} - \frac{1-e^2}{e} \cos v \right) \cdot K_3 - \frac{1-e^2}{nae} \left(1 + \frac{r}{p} \right) \cdot \sin v \cdot K_2
 \end{aligned} \tag{2}$$

де $K_1 = a_u$; $K_2 = a_v$; $K_3 = a_r$.

В таблиці 2 приведені періоди і амплітуди гармонік коротко- і довгоперіодичних змін \dot{a} , \dot{e} , $\dot{\omega}$, \dot{i} , $\dot{\Omega}$, \dot{M} там, де ці зміни існують. Довгоперіодичні зміни (з періодом близько 1 року) мають лише \dot{e} , $\dot{\omega}$, \dot{M} . Їх короткоперіодичні зміни мають період $\sim 0,5$ діб. Період короткоперіодичних змін \dot{a} , \dot{i} , $\dot{\Omega}$, становить ~ 1 добу.

Таблиця 2

Періоди і амплітуди основних гармонік зміни \dot{a} , \dot{e} , $\dot{\omega}$, \dot{i} , $\dot{\Omega}$, \dot{M}

	Короткоперіодичні гармоніки		Довгоперіодичні гармоніки	
	Період, діб	Амплітуда	Період, діб	Амплітуда
\dot{a}	~ 1	25 – 250 м/d		Немає
\dot{e}	0.494 ± 0.019	$(0.1 - 1.4) \cdot 10^{-6} \text{ d}^{-1}$	377.6 ± 15.7	$(0.5 - 4.5) \cdot 10^{-6} \text{ d}^{-1}$
$\dot{\omega}$	0.485 ± 0.019	$(0.001 - 0.120) \text{ }^\circ/\text{d}$	376.9 ± 14.4	$(0.004 - 0.450) \text{ }^\circ/\text{d}$
\dot{i}	~ 1	$(0 - 60) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ/\text{d}$		Немає
$\dot{\Omega}$	~ 1	$(0 - 600) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ/\text{d}$		Немає
\dot{M}	~ 0.5	$(0.01 - 0.20) \text{ }^\circ/\text{d}$	~ 365	$(0.03 - 0.60) \text{ }^\circ/\text{d}$

В статті [4] за 1995 рік на основі теоретичних досліджень було зроблено висновок, що пряме сонячне випромінювання не може привести до довгоперіодичних і віко-

вих змін у великій піввісі, ексцентриситеті і нахилі орбіти геосинхронного супутника. Проте нами знайдені довгоперіодичні ($T = \sim 1$ рік) гармоніки зміни ексцентриситету. Цей період зміни \dot{e} отримується і від прямого сонячного світла, і від розсіяного від Землі випромінювання (рис. 5), яке в ~ 120 разів слабше від сонячного.

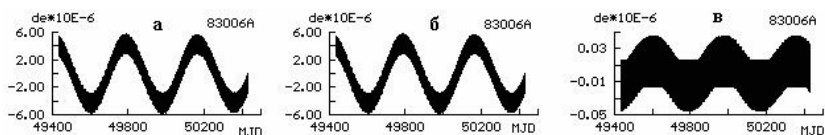


Рис. 5. Зміна \dot{e} супутника 83006A в інтервалі 1000 діб: (а) під дією прямого сонячного випромінювання і випромінювання Землі, (б) під дією лише прямого сонячного випромінювання, (в) під дією випромінювання Землі.

Довгоперіодичні зміни $\dot{\Omega}$ для трьох супутників приведені на рис. 6. Амплітуда довгоперіодичних змін супутника 65025A досить швидко зростає. Лібраційний супутник 65025A на епоху каталогу 1996 р. мав близький до максимуму нахил орбіти i , і він зменшувався.

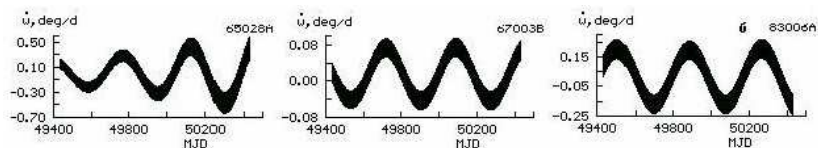


Рис. 6. Зміна $\dot{\Omega}$ трьох супутників в інтервалі 1000 діб.

На рис. 7 приведено для трьох супутників зміну $\dot{\Omega}$ протягом 2,5 років (913 діб). Короткоперіодичні коливання (з періодом 1 доба) на рис. 7 злилися в суцільні області. З періодом близько 0.5 року відбувається зміна амплітуди

короткоперіодичних коливань. Коливання з мінімальною амплітудою відбуваються приблизно в дні весняного і осіннього рівнодення, максимальна амплітуда коливань – в дні літнього і зимового сонцестояння. Так само відбувається зміна \dot{i} . Але максимальна амплітуда короткоперіодичних коливань зміни $\dot{\Omega}$ на великих проміжках часу змінюється обернено зміні нахилу орбіти

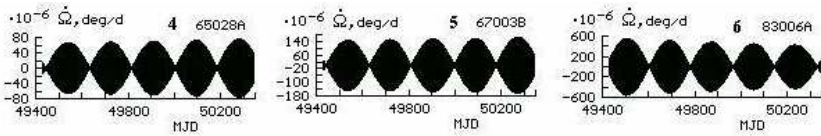


Рис. 7. Зміна $\dot{\Omega}$ трьох супутників в інтервалі 2,5 років, починаючи з 21 березня 1994 року.

Величина \dot{M} під дією сонячного випромінювання при довгоперіодичних змінах коливається з невеликою амплітудою A_d навколо деякого ненульового значення \dot{M}_0 з періодом близько одного року (рис. 8). В окремих супутників довгоперіодична гармоніка може бути відсутня, наприклад, в лібраційного супутника 83089В (супутник 9 на рис. 8). Амплітуда A_k короткоперіодичних коливань \dot{M} – це половина товщини кривих на рис. 8, вона ще менша, ніж A_d .

В дрейфуючих супутників (1, 2, 5 на рис. 8) довгоперіодичні коливання майже синусоїдальні, в лібраційних супутників (3, 4, 9 на рис. 8) амплітуда дуже сильно змінюється або навіть взагалі відсутня довгоперіодична гармоніка.

Короткоперіодичні зміни \dot{M} мають період 0,5 доби (рис. 8). В деяких супутників появляються періодичні змі-

ни з більшими періодами: 30 діб (спутник 1), 22 доби (спутник 2) і близько 60 діб (спутник 83006А).

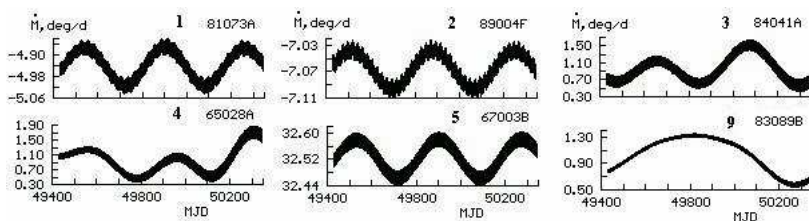


Рис. 8. Зміна \dot{M} шести супутників під дією сонячного випромінювання в інтервалі 2,5 років.

ЛІТЕРАТУРА

1. Арнольд К. Методы спутниковой геодезии. – М.: Недра, 1973. – 224 с.
2. Сочилина А.С., Киладзе Р.И., Григорьев К.В., Вершков А.Н. Каталог орбит геостационарных спутников. – С.-Петербург: ИТА РАН, 1996. – 103 с.
3. Вершков А.Н. Электронная форма Каталога орбит геостационарных спутников // Наблюдения естественных и искусственных объектов. Тезисы. С.-Петербург, ИТА РАН, 1996.
4. Смирнов М.А., Микиша А.М. Вековая эволюция высокоорбитальных космических объектов под действием светового давления // Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор). – М.: Космосинформ, 1995. – С. 252 – 271.