

# ВРАХУВАННЯ ТІНЬОВОЇ ФУНКЦІЇ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ВПЛИВУ ТИСКУ СОНЯЧНОЇ РАДІАЦІЇ НА РУХ ГЕОСИНХРОННОГО СУПУТНИКА

**В.У. Клімик, В.П. Єпішев, В.І. Кудак, Г.М. Мацо**

Ужгородський національний університет, Лабораторія космічних досліджень  
вул.Далека, 2а, 88000, Ужгород  
e-mail: space@univ.uzhgorod.ua

Досліджено вплив проходження геосинхронного супутника через тінь Землі на зміну його прискорення під дією тиску сонячної радіації та на зміну елементів орбіт. Знайдені похибки визначення елементів орбіт, зумовлені тиском сонячної радіації.

## Вступ

При дослідженні збурень в русі геосинхронних супутників (ГС) під дією сонячної радіації гармоніки зміни відповідних параметрів ГС визначаються простіше, якщо не враховувати тінювих функцій  $\gamma_1, \gamma_2$ . Власне випромінювання Землі і відбите Землею сонячне світло (що враховується тінювою функцією  $\gamma_2$ ) приводить до того, що добова зміна величини прискорення ГС під дією сонячної радіації не є гармонічною (синусоїдальною) [1]. Більше того, добові коливання величини прискорення відбуваються в протилежній фазі до коливань сили тиску на ГС прямого сонячного випромінювання. Коливання тиску зумовлені зміною відстані від Сонця до ГС.

Розглянемо модель збурень ГС під дією сонячної радіації, приведену в [1], але з врахуванням крім  $\gamma_2$  також тінювої функції  $\gamma_1$ .

## Зміна прискорення ГС під дією сонячного випромінювання

Перебування ГС в тіні Землі в формулі для визначення прискорення супутника під дією сонячної радіації [1, 2] можна врахувати через тінюву функцію

$$\gamma_1 = \begin{cases} 0, & \text{якщо } |\psi| \geq \pi - \frac{R}{r_{Sp}}, \\ 1, & \text{якщо } |\psi| < \pi - \frac{R}{r_{Sp}} \end{cases}, \quad (1)$$

де  $\Psi$  – кут між напрямками з центра Землі на Сонце  $S$  і на супутник  $Sp$  (рис. 1),  $r_{Sp}$  – геоцентрична відстань до супутника. Вхід і вихід з тіні Землі відбувається при деякому значенні  $\Psi = \Psi_0$ . Розглянемо кут  $\varphi = \pi - \Psi_0$ . Так як  $\varphi \approx \sin\varphi$  і  $\sin\varphi = R / r_{Sp}$  (рис. 1), то  $\varphi \approx R / r_{Sp}$ , звідки отримуємо формулу (1). Для ГС  $\varphi \approx 8.7^\circ$ . Отже, тривалість перебування ГС в тіні Землі протягом доби не може перевищувати  $\tau_{d,max} = \sim 0,024$  доби. І не кожної доби ГС проходить через тінь Землі.

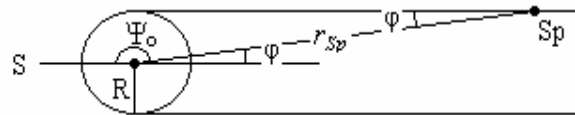


Рис. 1.

На рис. 2,а приведено зміну величини прискорення супутника 89004F протягом 3 діб під дією прямого сонячного випромінювання з врахуванням тінювої функції  $\gamma_1$ . Коли Земля перебуває між Сонцем та ГС (але ГС не в тіні), прискорення ГС – це мінімальні точки синусоїди, що зумовлено максимальною відстанню до Сонця. Зміна прискорення в інтервалі цих трьох діб без врахування тіні  $\Delta a_c = a_{max} - a_{min} = 0.034 \cdot 10^{-9} \text{ м/с}^2$ , що складає 0.12% від середнього значення прискорення  $a_c$ . В тіні на ГС діє лише власне випромінювання Землі, що приводить до прискорення ГС величиною  $a_{\text{тінь}} = 0,156 \cdot 10^{-9} \text{ м/с}^2$  (горизонтальні відрізки кривої на рис. 2,б). Зміна величини прискорення під дією сумарного

випромінювання Землі (рис. 2,б) зумовлена зміною випромінювання відбитого Землею сонячного світла. Ця зміна,  $\Delta a_3 = 0.271 \cdot 10^{-9} \text{ м/с}^2$ , майже в 8 разів більша від  $\Delta a_c$  – зміни прискорення від прямого сонячного випромінювання, хоча сама величина  $a_3$  на 2 – 3 порядки менша від  $a_c$ .

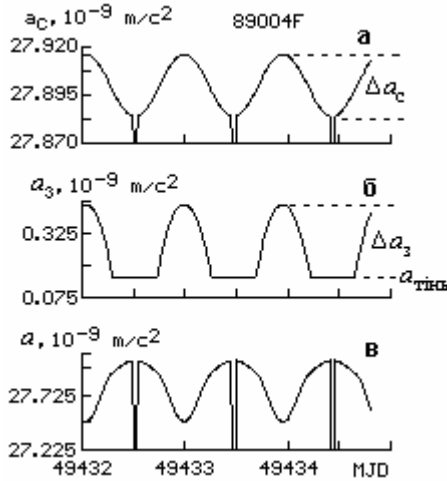


Рис. 2. Зміна величини прискорення  $a$  супутника протягом 3 діб, 21–23.03.1994, (а) під дією прямого сонячного випромінювання, (б) випромінювання від Землі і (в) сумарного випромінювання Сонця і Землі.

Величини прискорення  $a_c$  і  $a_3$  (рис. 2,а і рис. 2,б) змінюються в однаковій фазі (тобто максимуми і мінімуми співпадають в часі). Вектор прискорення  $\vec{a}_c$  в зоряній системі координат протягом кількох діб майже не змінює напрям, але вектор  $\vec{a}_3$  постійно обертається. Так що для ГС 89004F на період 21–23.03.1994 величина прискорення від випромінювання Сонця і Землі на початок доби буде  $a = a_c - a_3$ , а в полудень  $a = a_c + a_3$ . Так як вплив земного випромінювання на відносну зміну прискорення більший, ніж прямого сонячного світла внаслідок більшої зміни ( $\Delta a_3 > \Delta a_c$ ), то прискорення  $a$  (рис. 2,в) змінюється в протилежній до  $a_c$  і  $a_3$  фазі (переходи  $a_c$  в нуль тут не враховуємо). Крива зміни  $a$  відрізняється від синусоїди, що зумовлено формою кривої на рис. 2,б.

На рис. 3 приведено зміну прискорення супутника 89004F під дією сонячного випромінювання протягом 3 діб в орбітальній системі координат  $v, r, u$ . На

прискорення  $a_v$  (рис. 3,а) проходження супутника через тінь Землі майже не впливає, так як при перебуванні ГС в тіні кут між віссю  $v$  і сонячним променем близький до  $90^\circ$ . Перехід  $a_r$  в нуль (рис. 3,б) відбувається на максимальному  $a_r$ , коли вектор сили тиску сонячного світла і геоцентричний вектор  $\vec{r}_{Sp}$  мають однаковий напрям. Зміна  $a_u$  в інтервалі трьох діб (рис. 3,в) близька до лінійної, якщо не враховувати тінь Землі. Довгоперіодичні зміни має лише прискорення  $a_u$ .

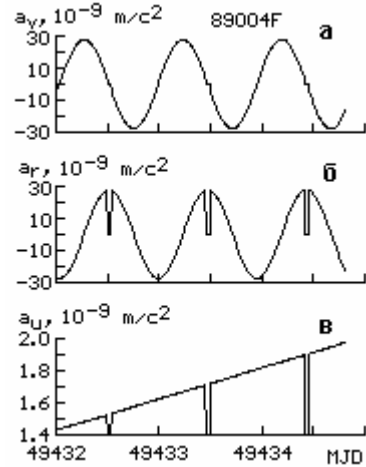


Рис. 3. Зміна проекцій прискорення супутника 89004F протягом 3 діб, 21–23.03.1994: (а) в напрямку руху супутника, (б) від центра Землі і (в) в напрямку перпендикуляра до площини орбіти.

При побудові графіків в інтервалі від 3 до 100 діб обрахунки велись з кроком 0.01 доби, в інтервалі декількох років – з кроком 0.05 доби, якщо не вказаний інший крок розбиття.

На рис. 4,а приведено зміну прискорення  $a_u$  ГС 89004F протягом  $\sim 3$  років. Супутник може перебувати в тіні в дні, близькі до весняного або осіннього рівнодення, коли  $|a_u| < 4 \cdot 10^{-9} \text{ м/с}^2$  (рис. 4,а), що відповідає парам трикутних областей на кривій. Такі області кривої, в околі точки MJD 49610, в збільшеному масштабі показано на рис. 4,б. Щоденні стрибки прискорення  $a_u$  ГС 89004F в нульове значення тривають протягом  $\Delta t_0 = 45$  діб (рис. 4,б) – це кількість діб, протягом яких щодня відбуваються проходження ГС

через тінь Землі. Так як такі інтервали спостерігаються через кожних 0.5 року, то процент днів з переходами ГС 89004F в тінь складає  $P = 25\%$ .

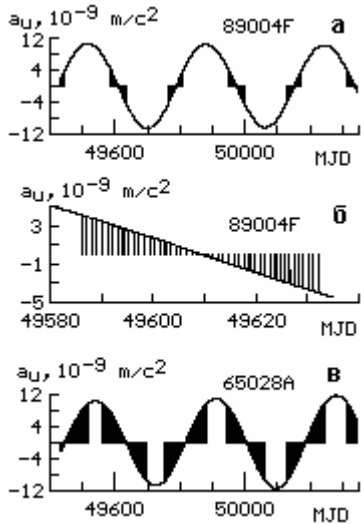


Рис. 4. Зміна прискорення  $a_u$ : (а) супутника 89004F протягом ~3 років і (б) протягом 60 діб та (в) супутника 65028A протягом ~3 років.

Величина інтервалу  $\Delta t_0$  досягає максимального значення  $\Delta t_0 = 120$  діб у супутника 65028A (рис. 4,в), що в 1994 році мав нахил орбіти  $i = 14,7^\circ$ , ексцентриситет  $e = 0,00066$ . Відповідно,  $P = 66\%$ . Спостерігається досить слаба кореляційна залежність  $\Delta t_0$  від нахилу орбіти  $i$  (рис. 5), коефіцієнт кореляції  $\rho = 0.73$ . В більшості випадків, навіть при великих нахилах орбіти, час  $\Delta t_0$  знаходиться в межах від 40 до 65 діб.

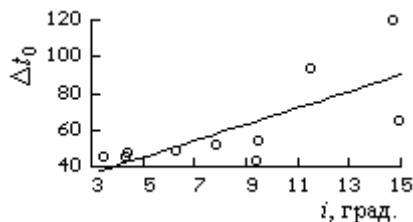


Рис. 5. Залежність кількості діб, протягом яких супутник щодня проходить через тінь Землі (в інтервалі з 1 липня по 1 грудня 1994 року), від нахилу орбіти ГС  $i$  за даними 10 супутників.

Отже, протягом року загальний час перебування супутника в тіні Землі не перевищує  $P_S = \tau_{d,max} \cdot P = 1,5\%$ . Він значно

менший цього числа, так як середнє значення часу перебування ГС в тіні за добу  $\tau_d$  менше  $\tau_{d,max}$ . В більшості супутників  $P_S$  не перевищує 0,5%.

### Вплив сонячного випромінювання на короткоперіодичні зміни елементів орбіт ГС

На зміну великої піввісі  $\dot{a}$  перебування супутника в тіні Землі впливає дуже мало, так як на цей час основна гармоніка зміни (без врахування тіньової функції) проходить через нульове значення. Проходження ГС 65028A через тінь Землі майже не впливає на зміну  $\dot{a}$  (рис. 6,а), так як це проходження відбувається при значення  $\dot{a}$  близьких нулю. Подібна картина спостерігається в інших супутників на будь-яких часових інтервалах (з переходами ГС через тінь Землі) тривалістю кілька діб.

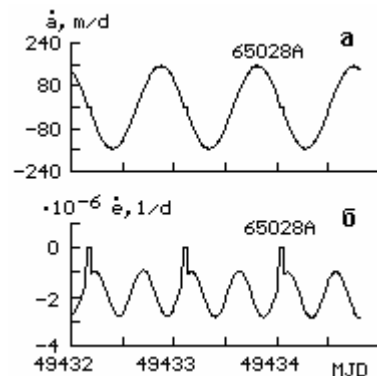


Рис. 6. Зміна протягом 3 діб (а) великої піввісі  $\dot{a}$  і (б) ексцентриситету  $\dot{e}$  супутника 65028A.

Графік зміни  $\dot{e}$  – це синусоїдальні коливання навколо значення, яке може бути відмінним від нуля відповідно до фази довгоперіодичної гармоніки зміни  $\dot{e}$ . Значення  $\dot{e}$  перетворюється в нуль в час перебування ГС в тіні (рис. 6,б).

Подібні властивості має зміна аргумента перигея  $\dot{\omega}$  (рис. 7,1), що як і  $\dot{e}$  має довгоперіодичну гармоніку. Стрибок до значення  $\approx 0$  не завжди співпадає з часом мінімуму (або максимуму) гармоніки. Зміна  $\dot{\omega}$  під дією випромінювання від Землі коливається навколо нуля (рис. 7,2). Ці коливання не є гармонічними, що зумовлено негармонічністю зміни  $\dot{\omega}$  під дією відбитого від Землі сонячного випромінювання (рис. 7,3), хоча

вони є періодичними коливаннями  $\dot{\omega}$  навколо нуля (нуль в тіні Землі). Зміна  $\dot{\omega}$  під дією інфрачервоного випромінювання – це гармонічні коливання  $\dot{\omega}$  навколо нуля (рис. 7,4). Подібні до розглянутих кривих (рис. 7,2-4) мають відповідні зміни інших елементів орбіт, крім  $\dot{M}$  – у формулі для її обчислення міститься член, що не залежить від зміни прискорення [3, 35].

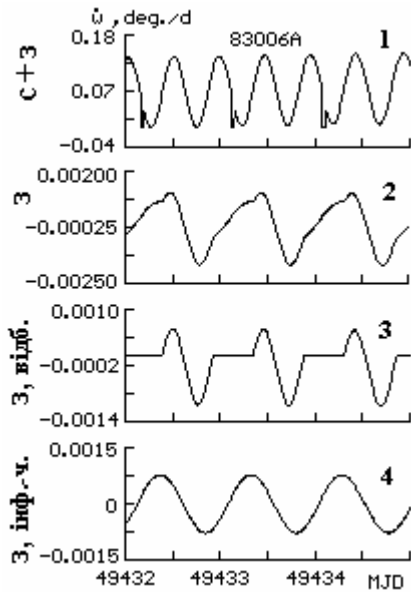


Рис. 7. Зміна протягом 3 діб аргумента перигея  $\dot{\omega}$  супутника 83006A під дією випромінювання (1) Сонця і Землі, (2) лише Землі, (3) відбитого від Землі сонячного випромінювання і (4) інфрачервоного випромінювання Землі.

Зміна нахилу орбіти  $\dot{i}$  та  $\dot{\Omega}$  (як і  $\dot{a}$ ) коливаються навколо нульового значення, так як  $i$  і  $\Omega$  не мають довгоперіодичних гармонік. Амплітуди добових гармонік  $\dot{i}$  і  $\dot{\Omega}$  змінюються з періодом 0.5 року. Перебування в тіні (перетворення  $i$  і  $\Omega$  в нуль) в різних супутників може відбуватися в будь-якій фазі  $\phi$  добової гармоніки, зокрема в супутника 67003B (рис. 8,а) при мінімальному  $\dot{i}$ . На рис. 8,б видно, що супутник 81076 з дня MJD 49436 перестав заходити в тінь Землі, припинились стрибки  $\dot{\Omega}$  в нульове значення.

Під час перебування ГС в тіні Землі значення зміни середньої аномалії  $\dot{M}$  не перетворюється в нуль, воно може навіть збільшуватися за величиною (рис. 8,в).

### Вплив тіньової функції на довгоперіодичні зміни елементів орбіт ГС

Довгоперіодичні зміни великої піввісі  $\dot{a}$  протягом двох років є добовими коливаннями, що на графіку зливаються в суцільну область. Для супутника 81073A – це вся сіра і чорна область на рис. 9,а. На графіку видно, що довгоперіодичних гармонік зміна  $\dot{a}$  не має, але спостерігається незначне коливання амплітуд добових гармонік з періодом 0,5 року. Максимуми – в дні, близькі весняним і осіннім рівноденням. Цим дням відповідають чорні області вздовж прямої  $\dot{a} = 0$ . Це стрибки  $\dot{a}$  на деякий час в нульове значення при проходженні ГС через тінь Землі. Вони відбуваються 1 раз на добу при невеликих значеннях  $\dot{a}$ . Це видно на рис. 6,а, а також на рис. 9,а – чорні області мають невелику висоту. При побудові графіка обчислювалися значення  $\dot{a}$  з кроком 0,005 доби.

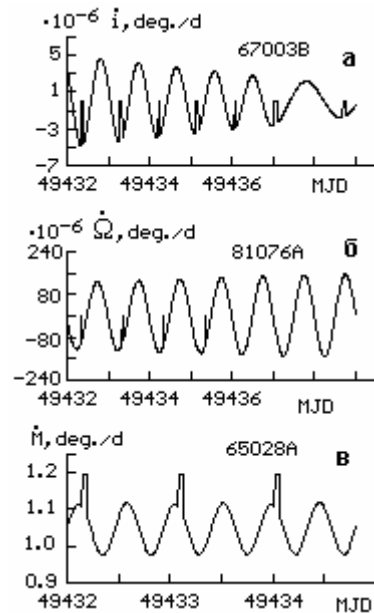


Рис. 8. Зміна (а) протягом 7 діб нахилу орбіти  $\dot{i}$  ГС 67003B і (б) довготи висхідного вузла  $\dot{\Omega}$  ГС 81076A та (в) протягом 3 діб середньої аномалії  $\dot{M}$  ГС 65028A.

На рис. 9,б приведено зміну протягом 2 років ексцентриситету  $\dot{e}$  супутника 73100D. Сірі області (і частково чорні) – це зміни  $\dot{e}$  без врахування тіньової функції  $\gamma_1$ . Чорні області появляються як результат переходу супутника через тінь Землі –

короточасні стрибки  $\dot{\epsilon}$  в значення  $\sim 0$  з частотою 1 раз на добу (рис. 6,б), які на графіках (рис. 9,б) зливаються в суцільні чорні області. Ці області з однаковою періодичністю (1 область на півроку) можуть по різному розміщуватися на синусоїдальних смугах, що зумовлені довгоперіодичними змінами  $\dot{\epsilon}$ , які мають період 1 рік. Ширина цих чорних областей  $\Delta t_0$  десяти ГС розглядалася на рис. 5. Положення точок (фаза) довгоперіодичної гармоніки не залежить від сезону року. На графіку рис. 9,б помітно, що переходи  $\dot{\epsilon}$  до нульового значення відбуваються не обов'язково з максимальної або мінімальної точки добової гармоніки (з межі синусоїдальної смуги). Це видно і на рис. 6,б.

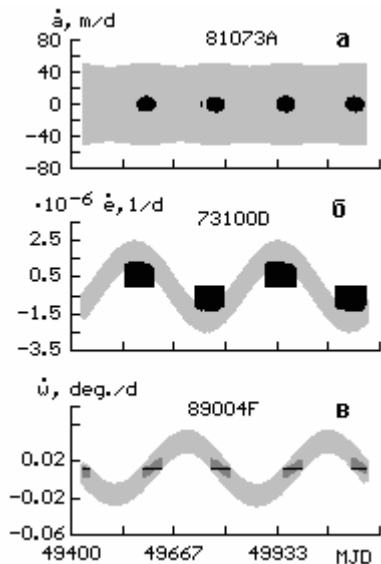


Рис. 9. Зміна протягом 2 років (а) великої піввісі  $\dot{a}$  ГС 81073А, (б) ексцентриситету  $\dot{e}$  ГС 73100D та (в) аргумента перигея  $\dot{\omega}$  ГС 83006А.

Зміна аргумента перигею  $\dot{\omega}$  мало відрізняється від зміни  $\dot{\epsilon}$ . На рис. 9,в сірим кольором показано зміну  $\dot{\omega}$  ГС 89004F. Темносірі області – це стрибки  $\dot{\omega}$  під час проходження супутником тіні Землі. Вони відбуваються не в 0, а в  $\dot{\omega}_0 \approx 0,01^\circ$  за добу. Те саме спостерігалось на рис. 6,в. Значення  $\dot{\omega}_0$ , коли ГС перебуває в тіні, зумовлені власним випромінюванням Землі на супутник. Вони на рис. 9,в показані чорними рисками на темносірому фоні. Кроки розбиття при побудові графіків на цьому рисунку  $\Delta t = 0,01$  доби.

Всі стрибки  $\dot{\omega}$  при проходженні тіні відбуваються не з екстремальних точок добової гармоніки, як і в супутника 83006А на рис. 6,в.

На рис. 10,а і рис. 10,б приведено зміну  $\dot{i}$  ГС 65028А і зміну  $\dot{\Omega}$  ГС 83006А на протязі двох років. Переходи ГС через тіню (чорні області на рис. 10,а і рис. 10,б) відбуваються в дні, близькі до днів весняного і осіннього рівнодення, коли добові коливання  $\dot{i}$  і  $\dot{\Omega}$  мають малу амплітуду. На рис. 10,а чорні області справа обмежені кривою лінією. Це означає, що в ці дні стрибки  $\dot{i}$  в нуль відбуваються не з максимального значення  $\dot{i}$ .

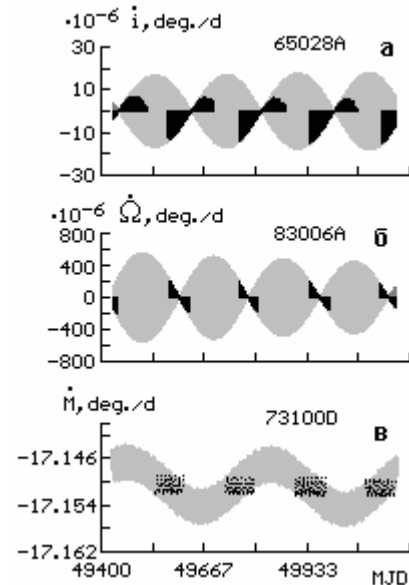


Рис. 10. Зміна протягом 2 років (а) нахилу  $\dot{i}$  ГС 65028А і (б) довготи висхідного вузла  $\dot{\Omega}$  ГС 83006А з врахуванням тіньової функції, чорні області, та (в) середньої аномалії  $\dot{M}$  ГС 73100D без врахування тіньової функції, чорні точки – значення  $M$  супутника в тіні Землі.

На рис. 10, в сірою синусоїдальною областю показана зміна  $\dot{M}$  протягом 2 років. Розрахунки проводились з кроком 0,005 доби. Довгоперіодичні зміни з періодом 1 рік відбуваються не навколо нульового значення  $\dot{M}$ . Коли супутник перебуває в тіні,  $\dot{M}$  відмінне від нуля, в супутнику 73100D  $\dot{M}$  набуває деяких середніх значень, які на рис. 10,в показані чорними точками, що групуються біля перетину довгоперіодичної гармоніки з віссю цієї гармоніки.

Отже, перебування супутника в тіні Землі на зміну елементів орбіт і на прискорення ГС має незначний вплив. Досить малий час супутник знаходиться в тіні. Та і проходження його через тінь відбувається не щодня. Протягом року спостерігаються два часові інтервали щоденних переходів ГС через тінь, центри яких близькі до днів весняного або осіннього рівнодення. Для  $i$  і  $\dot{\Omega}$  ці інтервали співпадають з інтервалами переходу амплітуд добових коливань через нуль. Межі значень змін  $\dot{M}$  і  $\dot{\omega}$  в тіні в більшості супутників майже не виходять за межі значень їх добових коливань на відповідних часових інтервалах. Проходження ГС через тінь Землі відбувається в час, коли добові гармоніки зміни піввісі  $\dot{a}$  проходять через нуль, так що тінь майже не впливає на зміну  $\dot{a}$ . Також незначним є вплив тіні на зміну  $\dot{e}$ .

### Особливості зміни середньої аномалії $\dot{M}$ під дією сонячної радіації

Дія сонячної радіації на зміну середньої аномалії дрейфуючого ГС (тип D) суттєво відрізняється від її дії на  $\dot{M}$  лібраційного супутника (L). На рис. 11 приведено зміну  $\dot{M}$  трьох дрейфуючих супутників протягом 4 років під дією сонячної радіації (без врахування тіньової функції  $\gamma_1$ ).

Довгоперіодичні зміни  $\dot{M}$  кожного супутника типу D виражаються гармоніками з періодом  $\sim 1$  рік. На рис. 11,а вона показана світлою лінією на чорному фоні. Амплітуди гармонік малі, в різних супутників вони знаходяться в межах від  $0,004^\circ/\text{d}$  до  $A_{D,\text{max}} = 0,20^\circ/\text{d}$ , середнє значення  $A_D = 0,09^\circ/\text{d} \pm 0,07^\circ/\text{d}$ . Коливання відбуваються навколо середніх значень  $\dot{M}_{\text{сер}}$ , які визначаються величиною дрейфу  $\dot{\lambda}$  супутника:  $\dot{M}_{\text{сер}} = 1,08 \cdot \dot{\lambda} + 1,44^\circ/\text{d}$ , коефіцієнт кореляції  $\rho = 0,9999$ . Середнє квадратичне відхилення значень  $\dot{M}$  від річної гармоніки  $\sigma = 0,023^\circ/\text{d} \pm 0,019^\circ/\text{d}$ .

Крім півдобових і річних гармонік зміни  $\dot{M}$  всі дрейфуючі супутники мають ще одну слабу гармоніку з періодом, що

знаходиться в межах від 6 до 85 діб. Зокрема періоди  $\dot{M}$  супутників (а) – (в) на рис. 11 відповідно рівні 9, 25, 80 діб. Спостерігається слаба кореляційна залежність цих амплітуд від  $1/|\dot{\lambda}|$ , коефіцієнт кореляції  $\rho = 0,75$ .

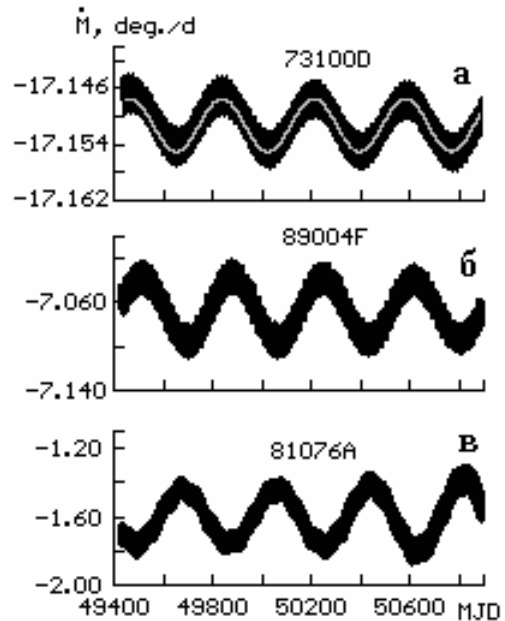


Рис. 11. Зміна протягом 4 років  $\dot{M}$  трьох дрейфуючих ГС (без врахування переходу ГС через тінь Землі).

На рис. 12 приведено зміни  $\dot{M}$  шести лібраційних ГС протягом  $\sim 4$  років під дією сонячного випромінювання (без врахування тіньової функції  $\gamma_1$ ). Довгоперіодичні зміни  $\dot{M}$  кожного супутника типу L виражаються гармоніками з періодом  $\sim 1$  рік. На рис. 12 вони для кожного супутника показані сірими лініями, синусоїдами.

Амплітуди річних гармонік більші, ніж в дрейфуючих супутників. В різних супутників вони знаходяться в межах від  $0,11^\circ/\text{d}$  до  $A_{L,\text{max}} = 0,55^\circ/\text{d}$ , середнє значення  $A_L = 0,36^\circ/\text{d} \pm 0,16^\circ/\text{d}$ . Коливання відбуваються навколо середніх значень  $\dot{M}_{\text{сер}}$ , які практично однакові для всіх лібраційних ГС:  $\dot{M}_{\text{сер}} = 0,966^\circ/\text{d} \pm 0,028^\circ/\text{d}$ .

Кожний супутник має річну гармоніку, але довгоперіодичні зміни досить сильно відрізняються від гармонічних, особливо в

ГС 83089В, рис. 12,а. Середнє квадратичне відхилення значень  $\dot{M}$  від річної гармоніки велике:  $\sigma = 0,21^\circ/d \pm 0,04^\circ/d$ .

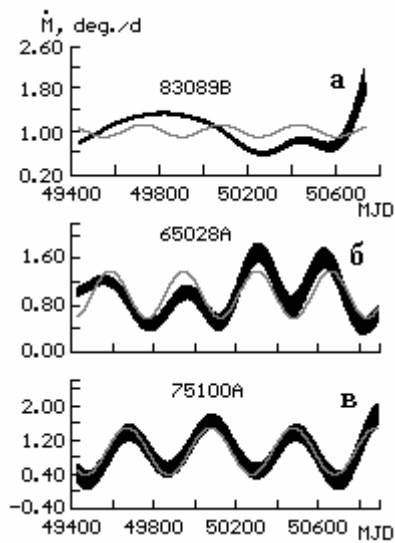


Рис. 12. Зміна протягом ~4 років  $\dot{M}$  трьох лібраційних супутників (без врахування переходу ГС через тінь Землі).

Лібраційні супутники мають лише 2 гармоніки: півдобову і річну.

Знайдені максимальні амплітуди річних гармонік використаємо для дослідження похибок.

### Похибки у визначенні елементів орбіт, зумовлені тиском світла

Результатом прискорення супутника, спричиненого тиском сонячного випромінювання, є періодичні зміни елементів орбіт. При цьому елементи  $\dot{a}$ ,  $\dot{i}$ ,  $\dot{\Omega}$  мають лише короткоперіодичну гармоніку з періодом ~1 доба;  $\dot{e}$ ,  $\dot{\omega}$ ,  $\dot{M}$  – гармоніку з періодом ~0,5 доби і довгоперіодичну гармоніку з періодом ~1 рік. Крім того,  $\dot{M}$  може мати слабкі гармоніки з періодом 22, 30, 60 діб і т.п.

Максимальною похибкою визначення параметра (наприклад  $\Delta a$ ), зумовленою тиском світла, можна вважати різницю між максимумом і мінімумом при гармонічному коливанні. Якщо період коливань  $T$  діб, то  $\Delta a$  визначається як інтеграл:

$$\Delta a = A \cdot \int_0^{T/2} \sin\left(\frac{2\pi \cdot t}{T}\right) dt = \frac{A \cdot T}{\pi}.$$

Більшість значень  $A_{\max}$  і  $T$  приведена в [1]. Проходження супутника через тінь Землі можна не враховувати, так як вплив його на величину  $\Delta a$  незначний.

- Період зміни  $\dot{a}$  рівний  $T = 1$  доби, амплітуда  $A$  не перевищує 250 м за добу. Тому максимальна похибка  $\Delta a = T \cdot A / \pi$  не перевищує **80 м**.

- Зміна  $\dot{e}$  має дві максимальні похибки. Короткоперіодична (за кілька діб) похибка  $\Delta e_k = T \cdot A / \pi = 0.5$  доби  $\cdot 1.5 \cdot 10^{-6} / \pi = \mathbf{0,24 \cdot 10^{-6}}$ , довгоперіодична (за 0.5 року і більше) –  $\Delta e_d = 365.25$  діб  $\cdot 4.5 \cdot 10^{-6} / \pi = \mathbf{520 \cdot 10^{-6}}$

- Максимальні похибки зміни  $\dot{\omega}$ : короткоперіодична  $\Delta \omega_k = 0.5^d \cdot 0.13^\circ/d / \pi = \mathbf{0.021^\circ}$ ; довгоперіодична  $\Delta \omega_d = 365.25^d \cdot 0.45^\circ/d / \pi = \mathbf{52^\circ}$

- Похибка зміни  $\dot{i}$ , що зумовлена сонячною радіацією, при визначенні нахилу орбіти не перевищує:  $\Delta i = 1^d \cdot 60 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ/d / \pi = \mathbf{19 \cdot 10^{-6}}$  градусів.

- Зміна  $\dot{\Omega}$ . Похибка не перевищує  $\Delta i = 1^d \cdot 600 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ/d / \pi = \mathbf{191 \cdot 10^{-6}}$  градусів.

- Зміна  $\dot{M}$ . Максимальна короткоперіодична похибка для дрейфуючих ГС:

$$\Delta M_{кD} = 0.5^d \cdot 0.07^\circ/d / \pi = \mathbf{0.011^\circ},$$

для лібраційних:

$$\Delta M_{кL} = 0.5^d \cdot 0.22^\circ/d / \pi = \mathbf{0.035^\circ};$$

Максимальна довгоперіодична похибка для ГС типу D:

$$\Delta M_{дD} = 365.25^d \cdot 0.20^\circ/d / \pi = \mathbf{23^\circ},$$

для ГС типу L:

$$\Delta M_{дL} = 365.25^d \cdot 0.55^\circ/d / \pi = \mathbf{64^\circ}.$$

Середні похибки елементів значно менші від максимальних.

### Висновки

В моделі з симетричними властивостями супутника в першому наближенні сонячна радіація приводить до періодичних змін в русі супутника. Періодичність порушується лише проходженням супутника через тінь Землі. Вікові зміни можуть спричинитися многократним проходженням через тінь Землі, але ці зміни дуже незначні і потребують дальших досліджень.

### Література

1. Клімик В.У., Єпішев В.П. та ін. // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. – Вип. 23, – Ужгород: УжНУ, 2008. – С. 164–171.  
[http://www.nbuu.gov.ua/Portal/natural/Nvunu/Fiz/2008\\_23/Klim.pdf](http://www.nbuu.gov.ua/Portal/natural/Nvunu/Fiz/2008_23/Klim.pdf)
2. Кудак В.І., Клімик В.У. та ін. // XI міжнародна наук.-практич. конф. «Людина і космос», 8-10.04.09 (збірник тез). – Дніпропетровськ: НКАУ, НЦАОМ, 2009. – С. 148.
3. Арнольд К. Методы спутниковой геодезии. – М.: «Недра», 1973. – 224 с.

## THE REGISTRATION OF A SHADED FUNCTION AT STUDY OF INFLUENCING OF STRESS OF A SOLAR RADIATION ON MOTION OF A GEOSYNCHRONOUS SATELLITE

**V.U. Klimyk, V.P. Yepishev, V.I. Kudak, G.M. Matso**

Uzhhorod National University, Laboratory of space researches  
Daleka str. 2a, 88000, Uzhhorod, Ukraine  
e-mail: space@univ.uzhgorod.ua

Influencing of passing of a geosynchronous satellite through a shade of the Earth on his acceleration under operating of stress of a solar radiation and variation of members of orbits. The errors of definition of members of orbits (because of stress of a solar radiation) are computed.

## УЧЕТ ТЕНЕВОЙ ФУНКЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА ДВИЖЕНИЕ ГЕОСИНХРОННОГО СПУТНИКА

**В.У. Климик, В.П. Епишев, В.И. Кудак, А.М. Мацо**

Ужгородский национальный университет, Лаборатория космических исследований  
ул. Далёкая, 2а, 88000, Ужгород  
e-mail: space@univ.uzhgorod.ua

Исследовано влияние прохождения геосинхронного спутника через тень Земли на изменение его ускорения под воздействием давления солнечной радиации и на изменение элементов орбит. Найдены погрешности определения элементов орбит, обусловленные давлением солнечной радиации.