

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ РУХУ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ГЕОСТАЦІОНАРНИХ ОРБИТАХ

**А.Г.Кириченко, В.У.Клімик, К.А.Кудак,
Г.М.Мацо, М.І.Демчик**

Ужгородський державний університет, 294000, Ужгород, вул.Волошина, 54

На основі фотографічних спостережень геостационарних об'єктів і їх каталогізації розглядається питання еволюції елементів орбіт з метою отримання ефемерид для спостережень пасивних об'єктів. Приводиться розташування деяких спостережуваних об'єктів в двох зонах "колокації".

Вступ

В останнє десятиріччя появилось абсолютно нове поняття – "космічне сміття" ("Space debris"). Ним називають супутники, які вичерпали свої енергетичні ресурси, верхні ступені ракет-носіїв, різні деталі, які появляються при запуску штучних небесних тіл (ШНТ), і багато іншого, що вже ніколи не принесе користі, але практично залишиться навечно в навколосемному просторі. Найбільш засміченими є області орбіт супутників на висотах 850 – 1200 км і в зоні геостационарних орбіт на висоті біля 40000 км. Тому актуальною і в той же час складною є проблема неперервного відсліджування більшості ШНТ, що визнано всіма світовими товариствами.

Супутник, який знаходиться на геостационарній орбіті, здійснює один оберт навколо Землі рівно за $23^h56^m04^s$. Велика піввісь ідеальної геостационарної орбіти – біля 42160 км, а ексцентриситет і нахил до площини земного екватора рівні нулю. При цих умовах геостационарний супутник нерухомо висить над певною точкою екватора. Завдяки цій властивості геостационарна орбіта використовується для розміщення на ній супутників зв'язку. Оскільки надекваторіальна зона на висотах розташування геостационарних об'єктів вже заповнена досить густо, то Міжнародний Телекомукаційний Союз (ITU) виступає міжнародним регулятором використання геостационарного кільця (± 150 км від екватора по широті). Кожній

країні відведені певні інтервали довгот і встановлені межі зміщення геостационарних супутників вздовж номінальної для кожного супутника довготи – $0,1^\circ$, що відповідає 74 км. Енергетичні ресурси корекційних двигунів визначають час активного існування супутника на орбіті – це приблизно 10 років. Далі супутник стає пасивним, тобто рухається під впливом гравітаційного поля Землі. Оскільки обертання супутника по орбіті співпадає з обертанням Землі навколо своєї осі, то виникають резонансні збурення в його русі, які приводять до довготного дрейфу і маятникового руху відносно стійких точок лібрації. Пасивні об'єкти еволюціонують за законами небесної механіки: площина орбіти прецесує з періодом 52 роки і з амплітудою до 15° . Запуск супутників на геостационарну орбіту розпочався в 1963 році, і вже через рік деякі з них перестали бути активними. В 90-их роках некерованих об'єктів стало настільки багато, що появилася загроза зіткнення ШНТ, утворення нових фрагментів космічного сміття. Це викликало необхідність тримати під контролем всі супутники, їх переміщення на геостационарній орбіті. Найбільш ефективні для цього є фотографічні камери з широким кутом зору.

Проблеми далекого космосу

Кількість осколків в космосі збільшується як на низьких, так і на високих орбітах. Якщо для

низькоперигейних об'єктів атмосфера є одним із факторів, які приводять до "чистки" навколоземного простору, то вік життя геостаціонарних об'єктів налічує мільйони років. Результати чисельного моделювання (Бордовицька и др. 1998) показують, що область розповсюдження хмари фрагментів, що утворились внаслідок розпаду супутника, досягає сотень тисяч кілометрів.

Ймовірність зіткнення на геостаціонарній орбіті можна оцінити лише чисто статистично, основуючись на випадковій поведінці об'єкту. Можливі різного виду колізії, які можуть бути спровоковані об'єктами, що знаходяться на перехідних орбітах. Такими є еліптичні орбіти: перигей знаходиться на низьких орбітах, а апогей на геостаціонарній. Якщо припустити можливість зіткнення в області густонаселених низьких орбіт, то хмара космічного "сміття" буде періодично перетинати геостаціонарну орбіту на дуже високих швидкостях. Така можливість підвищує небезпеку зіткнення на геостаціонарній орбіті.

Згідно сучасних уявлень навколоземний простір густо населений тілами різного розміру як штучного, так і природного походження. Фрагменти космічного "сміття" становлять реальну небезпеку для діяльності людини в космосі. Розробляються підходи до розв'язання задачі запобігання глобальних і локальних катастроф внаслідок падіння ШНТ (можливо з ядерними зарядами). Небезпека для Землі астрономічних об'єктів усвідомлена порівняно недавно.

Спостереження

Важливою і в той же час складною задачею контролю навколоземного космічного простору є ідентифікація (ототожнення) спостережуваного об'єкту з даними Каталогу Американської Служби NORAD (North American Aerospace Defense Command). Цей каталог найбільш повний і містить 7000 об'єктів. Пункт Ужгород входить в Службу Контролю Космічного Простору Росії, яка включає ще вісім пунктів: Симеїз

(Україна), Звенігород, Зеленчук, Монди, Коуровка (Росія), Душанбе (Таджикистан), Алма-Ата (Казахстан), Ашхабад (Туркменія). Спостереження геостаціонарних космічних об'єктів в лабораторії космічних досліджень Ужгородського державного університету ведуться з 1977 року на камері SBG (виробництво К.Цейс, Йена). Це камера системи Шмідта з виправленою кривизною поля. Діаметр вхідного отвору – 43 см, фокусна відстань – 76 см. Монтування камери 4-вісне. Знімання здійснюється на фотопластинки розміром 9×12 см, що відповідає полю зору 6°×8°. Методика спостережень геостаціонарних об'єктів на камері (Игнатович 1983) забезпечує точність визначення положення супутника $\sigma_\alpha = 0,63''$, $\sigma_\delta = 0,64''$. Реєстрація моментів часу здійснюється з точністю 0,01^s. В 1998 році змінено режим фотографування геостаціонарних супутників, якого дотримувалися з 1977 року. На кожному негативі отримуємо не два, як було раніше, а три зображення супутника з інтервалами 2 хвилини. Стало можливим впевнено провести ототожнення супутника на основі лише одного негатива.

На рис.1, 2, 3 приведені розташування пасивних і керованих (активних) об'єктів, які можна спостерігати в пункті Ужгород на даний момент часу. Активні об'єкти, зображення яких на рис. 3 співпадають, показані на рис. в стовпчиках. Це явище, коли два або більше об'єктів знаходяться в одному довготному вікні в інтервалі 0,1°, називається "колокацією" (Рыхлова 1995). В довготному вікні 5°÷292° спостерігається понад 140 таких зон. В них на час MJD 50814,0 – 51148,0 знаходилось по 2 – 8 об'єктів. На рис. 4 приведені розташування спостережуваних об'єктів в двох зонах на 6 різних моментів часу протягом 1998 року.

Дрейф, град за добу

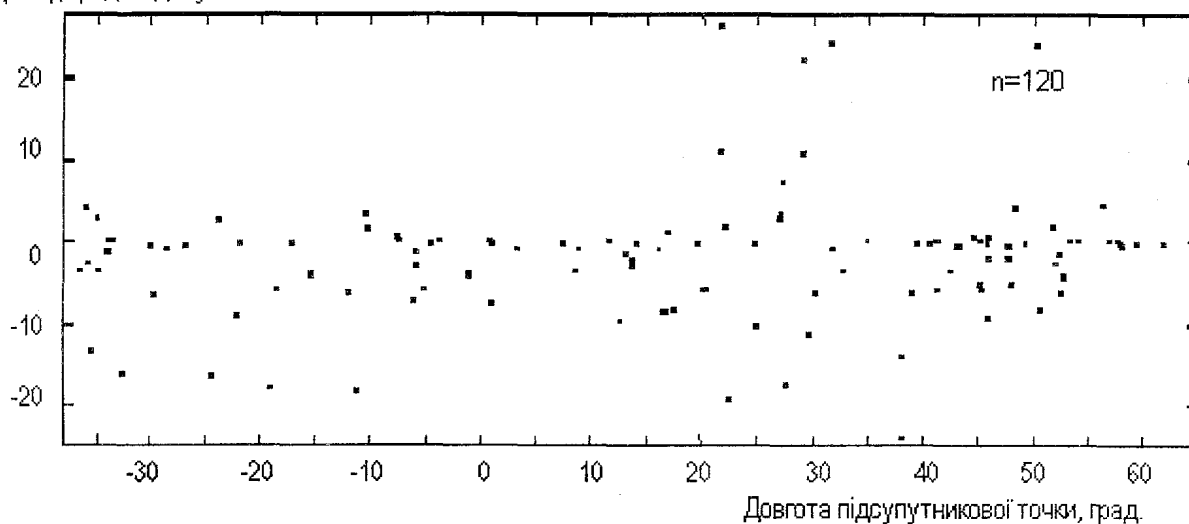


Рис. 1. Розташування некерованих геостационарних супутників на 25 грудня 1998 року над пунктом Ужгород і їх дрейф.

i , град.

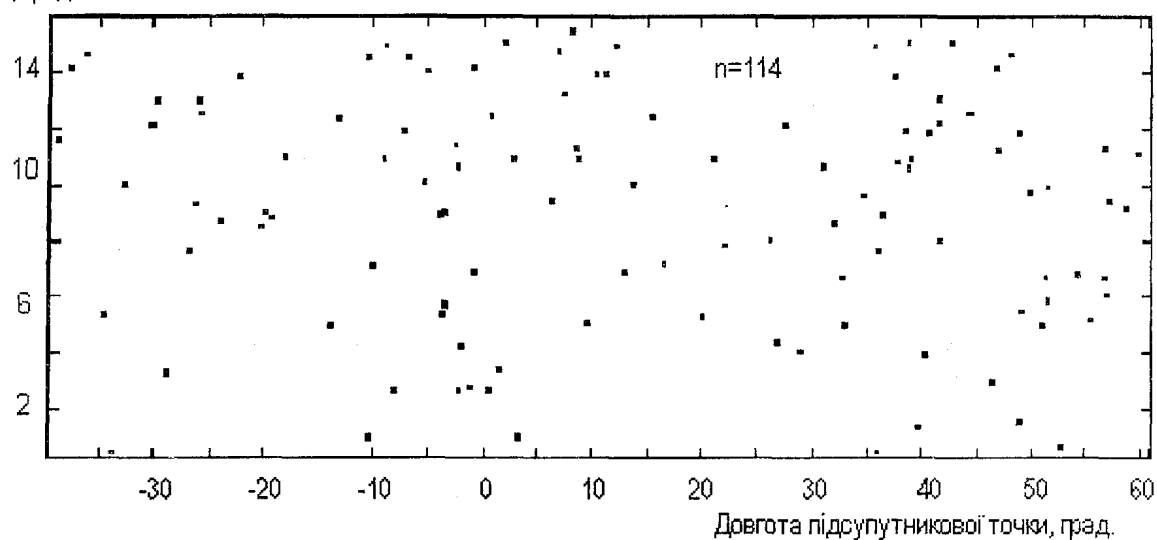


Рис. 2. Розташування некерованих геостационарних супутників на 25 грудня 1998 року над пунктом Ужгород і нахил їх орбіти.

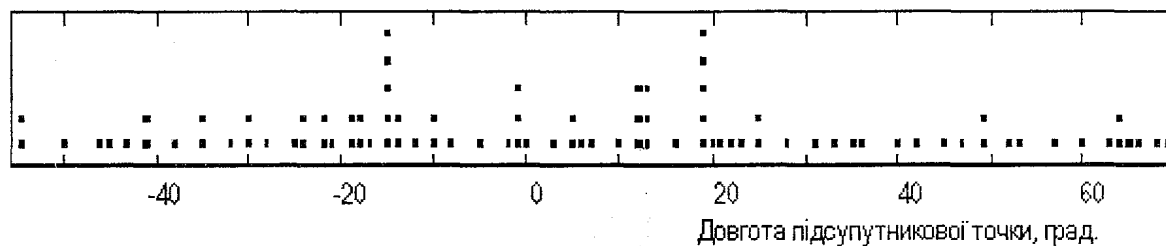


Рис. 3. Розташування керованих геостационарних супутників на 25 грудня 1998 року над пунктом Ужгород з нульовим дрейфом.

Астрометрична обробка результатів спостережень проводилась в системі каталога SAO (Smithsonian astrophysical observatory Star Catalog) на епоху 1950.0, а з початку 1998 року – в системі PPM (Position and Proper Motions) на епоху 2000.0. Для спостереження пасивних (некерованих) об'єктів потрібно знати ефемериди. В таблиці 1 приведені результати спостережень геосинхронних об'єктів в пункті Ужгород. Геосинхронними об'єктами називаються геостаціонарні об'єкти з великими нахилами площини орбіти до екватора.

Ототожнення геосинхронних об'єктів

Ототожнити (ідентифікувати) об'єкт – це значить за деякими параметрами приписати об'єкту міжнародний номер. Параметри визначаються на основі координатної і некоординатної інформації. За обчисленими точними положеннями геосинхронних космічних об'єктів, приведених на моменти спостережень, визначались елементи оскулюючих колових орбіт (Кириченко і др. 1994). В основу методу визначення орбіт покладено обчислення геоцентричних підсупутникових координат об'єкта за реальними спостереженнями. Топоцентрична відстань до об'єкту визначається за формулою

$$\rho = \sqrt{(\vec{R} \cdot \vec{\rho}_0)^2 + r^2 - R^2 - \vec{R} \cdot \vec{\rho}_0},$$

де $\vec{\rho}_0$ ($\cos\delta\cos\alpha$, $\cos\delta\sin\alpha$, $\sin\delta$) – одиничний вектор топоцентричного напрямку на супутник, \vec{R} – радіус-вектор пункту спостережень (його географічні координати φ, λ), r – геоцентрична відстань до об'єкта. Обчислюючи ρ , φ , λ і враховуючи, що довгота підсупутникової точки

$$\lambda = M + \omega + \Omega - S, \tag{1}$$

розв'язуємо методом найменших квадратів систему виду

$$\left. \begin{aligned} x_j &= r \cdot (\cos u \cos \Omega^* - \sin u \sin \Omega^* \cos i) \\ y_j &= r \cdot (\cos u \sin \Omega^* + \sin u \cos \Omega^* \cos i) \\ z_j &= r \cdot \sin u \sin i \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

В (1) і (2) $\Omega^* = \Omega - S$, Ω – довгота вузла, M – середня аномалія, ω – аргумент перигею (для кругової орбіти $M + \omega = u$), S – зоряний гринвіцький час, x_j, y_j, z_j – геоцентричні координати супутника в j -ий момент часу. На другому етапі відбувається уточнення обчислених елементів орбіти i, Ω, u так, щоб невязки координат супутника, отриманих з (2) і системи

$$\left. \begin{aligned} x_j' &= X + \rho \cos \delta_j \cos \alpha_j \\ y_j' &= Y + \rho \cos \delta_j \sin \alpha_j \\ z_j' &= Z + \rho \sin \delta_j \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

були мінімальними. В (3) α_j, δ_j – топоцентричні екваторіальні координати супутника, X, Y, Z – координати вектора \vec{R} . Ототожнення геостаціонарних об'єктів значно полегшується при введенні площини Лапласа для дослідження еволюції орбіт супутників (Гаязов, Сочилина 1986).

Використання цього методу і порівняння обчислених елементів орбіт з каталожними елементами дає можливість ототожнити спостережуваний об'єкт, присвоїти йому ім'я згідно з каталогом.

Таблиця 1. Результати спостережень і ототожнення геосинхронних об'єктів.

Дата спостережень	Кількість об'єктів	Кількість положень	Результати ототожнення, кількість об'єктів:		
			Ототожнених	неототожнених	всього
1995	288	1516	57	75	132
1996	281	1273	81	43	124
1997	105	450	53	22	75
1998	281	1015	До кінця не проаналізовано.		
Всього	955	4254			

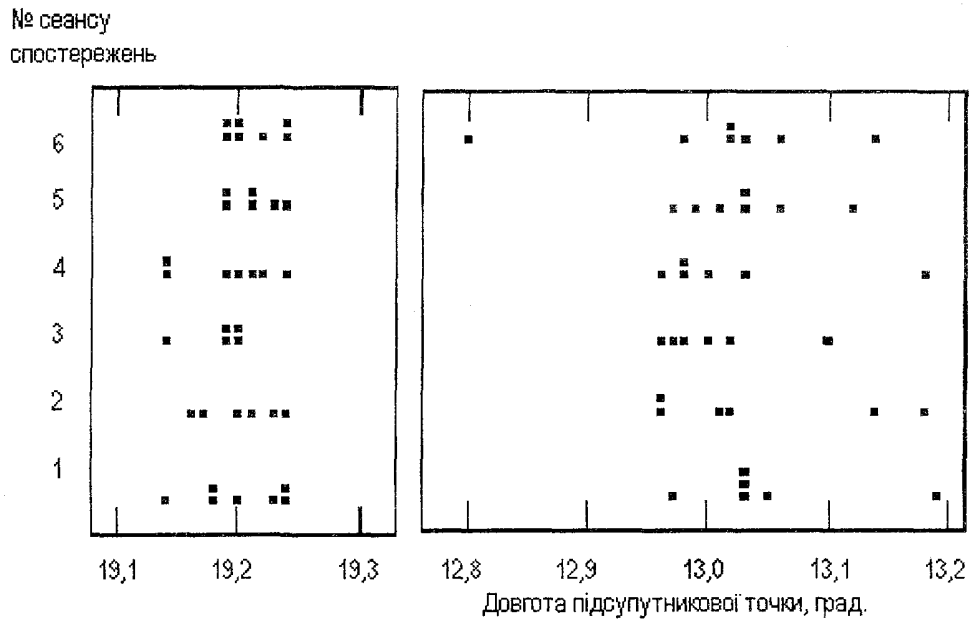


Рис. 4. Розташування спостережуваних геостаціонарних об'єктів в інтервалі MJD 50845.9-51130.9 в двох зонах "колокації" в пункті Ужгород.

Визначення складових компонентів елементів орбіт геосинхронних супутників

В теорії руху штучних супутників Землі відома задача, яка полягає в тому, що, знаючи початкові значення або усереднені елементи, на основі теорії, шляхом виключення короткої періодики, а інколи і довгої, можна одержати всі складові компоненти – вікові, довгоперіодичні і короткоперіодичні члени. Виявивши всі еволюційні закономірності кожного елементу орбіти, як функції часу, можна спрогнозувати будь-який елемент орбіти на заданий момент часу.

Вікові збурення першого порядку в елементах орбіти збільшуються лінійно по часу. Найбільші збурення від зональних гармонік спостерігаються в довготі вузла, аргументі перигею, середній аномалії. Довгоперіодичні збурення мають період від 100 до 200 діб. Короткоперіодичні збурення, викликані полем сили тяжіння Землі, мають періоди T , $T/2$, $T/4$ і т.д., де T – період обертання супутника. Для виділення

лінійного ходу в елементі орбіти розв'яжемо систему рівнянь

$$E = E_0 + \dot{E}_0(t - t_0) \quad (4)$$

методом найменших квадратів відносно невідомих E_0, \dot{E}_0 . Елементи орбіт обчислимо, використовуючи електронну версію каталогу (Вершков 1996). В таблиці 2 приведені деякі пасивні супутники типу l_1, l_2, l_3 (лібраційні) і типу d_2 (дрейфуючі) і їх параметри, для яких в заданих інтервалах часу обчислені елементи орбіти. В стовпчику 5 таблиці приведені мінімальна і максимальна площі мідельового перерізу об'єкту в m^2 , в стовпчику 7 – інтервали $(t - t_0)$, для яких обчислені елементи орбіт.

Як приклад, приведемо обчислені залежності (4) для 6 елементів орбіт об'єкту 82044 F(1₁):

$$\left. \begin{aligned} a &= 42141,27 + 0,013283(t - t_0) \\ e &= 0,001652 + 0,000547 \cdot 10^{14}(t - t_0) \\ i &= 8,300141 + 0,172597 \cdot 10^{12}(t - t_0) \\ \Omega &= 67,11179 - 0,012225(t - t_0) \\ \omega &= 213,4738 + 0,022537(t - t_0) \\ n &= 1,003559 - 0,476223 \cdot 10^{16}(t - t_0) \end{aligned} \right\} (5)$$

Тут i, Ω, ω – в градусах, a – в км, n – в обертах за добу. Наявність емпіричного

гальмування і методичних похибок зумовлює появу вікових членів в елементах a, i, e (ексцентриситет) в (5) (Сорокин 1996). Різниця вікових і обчислених збурень в елементах n, Ω, ω становить $(O-C)_{\Omega} = 0,00166^{\circ}$, $(O-C)_{\omega} = -0,00540^{\circ}$, $(O-C)_n = 0,000001$ об. за добу.

Формулу (4) можна доповнити членами ряду Фур'є $S_i(t)$, так що

$$E = E_0 + \dot{E}_0(t - t_0) + \sum_{i=1}^N S_i(t) + C_N(t), (6)$$

де

$$S_i(t) = A_i \cos(2\pi\nu_i t) + B_i \sin(2\pi\nu_i t) + S_{0i}.$$

Гармоніки $S_k(t)$ знаходимо так, щоб

залишковий член $\sum_{i=k+1}^N S_i(i) + C_i$ весь час

зменшувався при збільшенні k . Для кожного елемента орбіти E параметри A_i, B_i, T_i ($T_i = 1/\nu_i$), S_{0i} ряду Фур'є $S_i(t)$ визначаються як розв'язки системи 4-ох нормальних рівнянь

$$\sum V_{ki} \cdot \frac{\partial V_{ki}}{\partial A_i} = 0, \quad \sum V_{ki} \cdot \frac{\partial V_{ki}}{\partial B_i} = 0,$$

$$\sum V_{ki} \cdot \frac{\partial V_{ki}}{\partial S_{0i}} = 0, \quad \sum V_{ki} \cdot \frac{\partial V_{ki}}{\partial \nu_i} = 0, (7)$$

де
$$V_{ki} = E - E_0 - \dot{E}_0(t - t_0) - \sum_{i=1}^k S_i(t).$$

Сумування в (7) проводиться по множині значень елементів орбіти для різних MJD. Систему (7) можна розв'язати методом послідовних уточнень на сучасних комп'ютерах (IBM або Pentium) з наперед заданою кількістю точних цифр. Система перших трьох рівнянь (7) легко розв'язується аналітичними методами при заданому ν_i . Це дає можливість визначити початкове значення для уточнення. З сітки 200 значень ν_i на заданому інтервалі комп'ютер вибирає найбільш близьке до розв'язку значення. Функції $S_i(t)$ в (6) визначаються послідовно для $i = 1, 2, 3, \dots$. Процес закінчується на етапі, коли залишковий член ряду при заданій точності перестає зменшуватися. Програма дозволяє обчислювати параметри гармонік без віднімання їх від функції.

Вікові і довгоперіодичні збурення в елементах супутників за один оберт, обчислені за формулами Мерсона, приведені в табл. 3. В табл. $p = a(1 - e^2)$.

Таблиця 2. Деякі параметри пасивних геосинхронних об'єктів.

№ п/п	Міжнародний № об'єкту	Назва об'єкту	Тип	Розміри м2	Маса кг	Інтервал MJD
1	2	3	4	5	6	7
1	82044 F	Cosmos 1366	l_1	8,2→23,0	2475	48596÷51579
2	86090 D	Gorizont B	l_1	8,2→23,0	2475	48951÷50969
3	86027 A	Cosmos 1738	l_2	5,9→23,0	2113	48741÷51577
4	91064 A	Cosmos 2155	l_3	—	—	48676÷50911
5	81102 F	Raduga 10	d_2	8,2→23,0	2475	48759÷50842

Таблиця 3. Вікові і довгоперіодичні збурення в елементах геосинхронних супутників за один оберт.

Назва супутника	Δe	Δi , град.	Δp , м	$\Delta \omega$, град.	ΔM , град.	$\Delta \Omega$, град.
82044 F	$-9,68 \cdot 10^{-9}$	$6,2 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$6,38 \cdot 10^{-3}$	$-1,3 \cdot 10^{-2}$
86027 A	$-5,92 \cdot 10^{-9}$	$4,5 \cdot 10^{-9}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$6,69 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$
81102 F	$-3,64 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$	$6,14 \cdot 10^{-3}$	$-1,3 \cdot 10^{-2}$

Таблиця 4. Періоди і амплітуди довгоперіодичних збурень від резонансних гармонік геопотенціалу.

Назва супутника	T_λ діб	T_a діб	A_a км	T_Ω діб	A_Ω град.	T_ω діб	A_ω град.	T_i діб	A_i град.
82044 F	1872	1246	16,6	1245	0,3	1057	2,3	1242	0,082
86027 A	1364	1217	16,3	1018	0,4	3003	4,9	834	0,057
81102 F	1330	698	16,3	597	0,1	855	4,1	869	0,051

Аналізуючи весь спектр гармонік кожного елементу супутника можна знайти амплітуди і періоди гармонік резонансних збурень геопотенціалу (таблиця 4), збурень від Місяця, Сонця, а також за рахунок світлового тиску.

Обчислення (6) для кожного елементу орбіти може бути використано для знаходження наближених ефемерид.

Систематичні спостереження пасивних геосинхронних космічних об'єктів розширюють коло задач. Визначення найбільш ймовірної періодичної залежності, що враховує основні гармоніки зміни довготи підсупутникової точки, дало можливість проспостерігати пасивні об'єкти 85102A(11), 86090D(11), 87091D(12) і ін.

1. Бордовицына Т.В., Дружинина И.В. Сб. науч. трудов.М., "Космосинформ", 1998, с.102 – 118.
2. Игнатович С.И. Автореферат канд. диссертации. Киев, 1983.
3. Рыхлова Л.В. "Космосинформ", 1995, с.9-19.
4. Кириченко А.Г., Климик В.У. Набл. искусств. неб. тел. N 88, М., 1994, с.36 – 38.
5. Гаязов И.С., Сочилина А.С. Бюл. ИТА АН СССР. 15, № 9 (172), М., 1986, с.481-485.
6. Сорокин Н. Космическая геодезия и современная геодинамика. М, 1996, с.134-150.
7. Вершков А.Н. Набл. ест. и искусств. объектов. Тезисы. С.-Петербург, ИТА РАН, 1996.

RESEARCH OF DYNAMICS OF MOVEMENT OF SPACE OBJECTS ON GEOSTATIONARY ORBITS

**A.G.Kirichenko, V.U.Klimik, K.A.Kudak,
G.M.Matso, M.I.Demchyk**

Uzhgorod State University, 294000, Uzhgorod, Voloshin, 54

On the of photographic observations of geostationary objects and their cataloguing the problem of evolution of elements of orbits is discussed with the purpose of construction of ephemerises for observations of passive objects. Some positions of observing space objects in two zones "colocation".