

УДК 521.9 (085)

Л. М. Кізюн<sup>1</sup>, В. У. Клімик<sup>2</sup>, М. Р. Нестерук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України  
03680, Київ, МСП, вул. Академіка Заболотного 27

<sup>2</sup>Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету  
88000, Ужгород, вул. Далека 2а

**Каталог положень і елементів орбіт  
геосинхронних космічних об'єктів ГОСК-2001.  
Дослідження корекцій активних геостаціонарних супутників  
за результатами спостережень**

*Описано каталог ГОСК-2001 (каталог геосинхронних об'єктів: Київ), що містить топоцентричні екваторіальні координати і орбітальні елементи геосинхронних супутників, одержаних фотографічним методом в Головній астрономічній обсерваторії НАН України в 2001 р. Ототожнено 46 об'єктів за 318 спостереженнями із загального числа 636 спостережень 109 об'єктів. Отримано рівняння зв'язку між параметрами основної гармоніки зміни довготи підсупутникової точки некерованих лібраційних супутників типу  $l_1$ . Подані приклади дослідження корекцій геостаціонарних об'єктів на основі оцінки узгодженості функції зміни довготи з результатами спостережень. (<http://www.mao.kiev.ua/ast/cat2001.htm>).*

**КАТАЛОГ ПОЛОЖЕНИЙ И ЭЛЕМЕНТОВ ОРБИТ ГЕОСИНХРОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ГОСК-2001. ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕКЦИЙ АКТИВНЫХ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ**, Кизюн Л. Н., Климик В. У., Нестерук М. Р. — *Описан каталог ГОСК-2001 (Каталог геосинхронных объектов: Киев), содержащий топоцентрические экваториальные координаты и орбитальные элементы геосинхронных спутников, полученных фотографическим методом в Главной астрономической обсерватории НАН Украины в 2001 г. Отождествлено 46 объектов по 318 наблюдениям из общего числа 636 наблюдений 109 объектов. Получены уравнения связи между параметрами главной гармоники изменения долготы подспутниковой точки неуправляемых либрационных спутников типа  $l_1$ . Приводятся примеры исследования коррекций геостационарных объектов на основе оценки согласованности функции изменения долготы с результатами наблюдений спутников. (<http://www.mao.kiev.ua/ast/cat2001.htm>).*

**GOCK-2001 CATALOGUE OF POSITIONS AND ORBITAL ELEMENTS OF THE GEOSYNCHRONOUS SPACE OBJECTS OBSERVED IN 2001. INVESTIGATION OF THE CORRECTIONS OF ACTIVE GEOSTATIONARY SATELLITES USING OBSERVATION RESULTS**, by Kizyun L. M., Klimyk V. U., Nesteruk M. R. — *We describe the GOCK-2001 Catalogue*

*(Geosynchronous Objects Catalogue: Kyiv 2001) containing the topocentric equatorial coordinates and orbital elements of geosynchronous satellites obtained by photographic method at the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine in 2001. The results of the identification of 46 objects from 318 observations out of the total of 636 observations of 109 objects are presented. The equations of connection between the parameters of the main harmonic of the subsatellite longitude change for the uncontrolled libration satellites of type  $l_1$  are derived. Some examples of the investigation of corrections of geostationary objects based on the concordance of the longitude change function with the results of satellite observations are given. (<http://www.mao.kiev.ua/ast/cat2001.htm>).*

Фотографічні спостереження штучних супутників Землі проводились в Головній астрономічній обсерваторії Національної академії наук України на подвійному ширококутному астрографі (ПША) ( $D = 40$  см,  $F = 2$  м) способом, наведеним в [2, 8]. Спостереження здійснювались 17 лютого, 22, 24, 30 березня, 15, 25 травня, 12 червня, 8, 13, 15, 28 серпня, 17, 21 жовтня 2001 р. в інтервалі довгот підсупутникових точок  $7^\circ$  Е —  $37^\circ$  Е та  $40^\circ$  Е —  $80^\circ$  Е. Загальна кількість спостережуваних об'єктів сягає 96, з них ототожнено 45 активних і один пасивний об'єкт. 50 об'єктів не вдалося ототожнити у зв'язку з їхньою відсутністю в каталогах [6, 7].

Каталог GOCK-2001 містить таблицю, в якій наведені екваторіальні координати геосинхронних об'єктів в системі каталогу PPM на епоху J2000.0. Для кожного ідентифікованого об'єкта подані номер по каталогу [7], тип об'єкта, довгота підсупутникової точки, дрейф по довготі та нахил орбіти супутника до екватора Землі. Для неідентифікованих об'єктів при наявності більше двох спостережень наведена довгота підсупутникової точки, дрейф по довготі, нахил орбіти супутника до екватора, довгота висхідного вузла, аргумент перигею. Для всіх об'єктів елементи орбіт обчислювались методами, розробленими в Лабораторії космічних досліджень Ужгородського національного університету [5].

Ототожнення спостережуваних об'єктів виконано шляхом порівняння обчислених з поданими елементами орбіт в каталогах геосинхронних об'єктів [6, 7]. На грудень 2001 р. загальне число об'єктів в геостационарній зоні становило 906, з яких 321 активний і 585 пасивних [7]. Серед спостережених об'єктів є об'єкти, яких немає у згаданому каталозі.

Про необхідність дослідження руху пасивних об'єктів у зв'язку з ймовірністю зіткнення їх на геостационарних орбітах вже згадувалось в [3]. За результатами спостережень тепер досліджувалась наявність та періодичність корекції активних супутників.

Некеровані геостационарні супутники, величина дрейфу яких не перевищує  $2.5^\circ$  за добу, рухаються в режимі простої лібрації. Центрами лібрації можуть бути лише точки  $\lambda_1 = 75^\circ$  (супутники типу  $l_1$ ) і  $\lambda_2 = 255^\circ$  (супутники типу  $l_2$ ). Супутники типу  $l_2$  досягають лише довготи  $-12^\circ$ , в Києві їх спостерігати неможливо. Розглянемо лібраційні супутники типу  $l_1$ . Для 50 таких супутників наведені елементи орбіт в каталозі [6]. Коливання довготи таких супутників навколо точки з довготою  $75^\circ$  можна приблизно вважати гармонічними (синусоїдальними). Залежність довготи  $\lambda$  від середніх юліанських дат (MJD) для кожного супутника можна виразити співвідношенням

$$\lambda = A \sin \left( \frac{2\pi \cdot \text{MJD}}{T} + \varphi \right) + \lambda_0. \quad (1)$$

де амплітуда  $A$ , період  $T$  і фаза  $\varphi$  головної гармоніки, а також ордината  $\lambda_0$

осі синусоїди (величина зсуву синусоїди вгору або вниз) є сталими для кожного супутника.

Користуючись даними електронного каталогу [1], було обчислено для середніх юліанських дат 50 масивів довгот підсупутникових точок  $\lambda$  для інтервалу в один рік, а потім методом найменших квадратів обчислено чотири параметри із (1) для кожного супутника, а також середні квадратичні відхилення  $\Delta\lambda$  каталожних значень довгот  $\lambda$  для 50 супутників від обчислених довгот цих же супутників по формулі (1). На рис. 1 наведені криві зміни довгот супутників типу  $l_1$  із каталогу [6] за 2001 рік в зоні видимості їх в Києві. Криві на графіку є фрагментами синусоїд, знайдених методом найменших квадратів за каталожними [1] значеннями довгот.

Середні квадратичні відхилення  $\Delta\lambda$  каталожних значень довгот від обчислених за (1) залежать від періодів гармонік  $T$  розглянутих супутників (кружки на рис. 2) і можуть бути представлені параболою з точністю  $\pm 0.025^\circ$  (пунктирна крива):

$$\Delta\lambda = 5.75 - 0.0175T + 1.32 \cdot 10^{-5}T^2.$$

Довгота  $\lambda$  в виразі (1) залежить від чотирьох параметрів. Проте зміну довготи  $\lambda$  некерованих лібраційних супутників типу  $l_1$  можна охарактеризувати з певною точністю одним параметром — значенням довготи  $\lambda$  для крайнього західного положення супутника, тобто мінімальним значенням  $\lambda_m$  функції (1) для кожного супутника. Знаходження функції (1) за параметром  $\lambda_m$  надає можливість виявляти корекції керованих геоста-

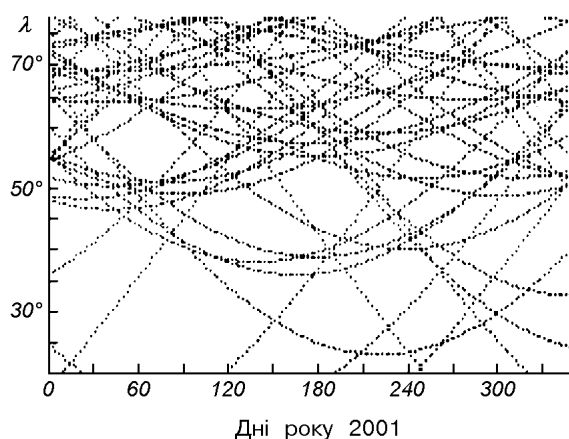


Рис. 1. Зміна довгот підсупутникових точок лібраційних супутників типу  $l_1$  в 2001 р. за даними каталогу [6] в зоні видимості їх в Києві

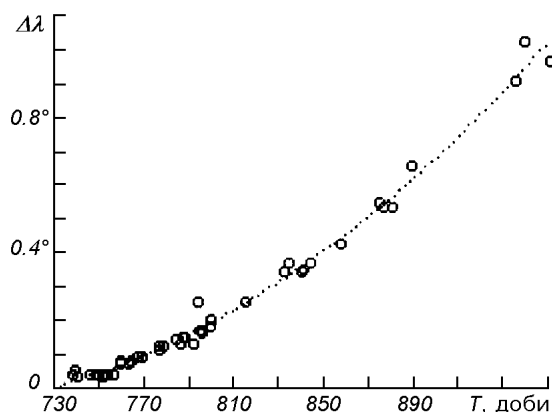


Рис. 2. Залежність середніх квадратичних відхилень довгот супутників від періоду гармоніки (1)

ціонарних супутників і деякі їхні характеристики. Це можливо тому, що після припинення корекції активний супутник починає рухатись як пасивний об'єкт з параметром  $\lambda_m$  (довгота підсупутникової точки активного супутника в момент закінчення корекції), причому значення довготи  $\lambda_m$  лібраційного супутника типу  $l_1$  буде змінюватись від  $0^\circ$  до  $70^\circ$ . Можна стверджувати, що на певному часовому проміжку проводилась корекція супутника, якщо його рух не задовольняє співвідношення (1). Зауважимо, що довгота  $\lambda_m$  обчислювалась спільно з параметрами  $A$ ,  $T$ ,  $\varphi$ ,  $\lambda_0$ ,  $\Delta\lambda$  для всіх 50 супутників. За обчисленими значеннями  $\lambda_m$ , отримані залежності для  $A$ ,  $T$ ,  $\lambda_0$ :

$$A = 68.5 - 0.80575\lambda_m - 0.0015478\lambda_m^2, \quad (2)$$

$$T = 735.607 + 1.4832A + 0.0059774A^2 + 0.00101925A^3, \quad (3)$$

$$\lambda_0 = 72.6195 + 0.013757T - 0.000014815T^2. \quad (4)$$

Для визначення фази  $\varphi$  використовується початкова умова, за якою  $\lambda(MJD_0) = \lambda_m$  (в даний момент часу  $MJD_0$  супутник перебував на довготі  $\lambda_m$ ). Тоді (1) набуває вигляду

$$\varphi = -\frac{2\pi \cdot MJD_0}{T} + 2\pi n - \frac{\pi}{2}, \quad (5)$$

де  $n$  необхідно вибрати таким, щоб  $\varphi$  було менше  $360^\circ$ .

Співвідношення (2)–(4) надають змогу побудувати залежність довготи підсупутникової точки  $\lambda$  від часу, тобто визначити зміну довготи  $\lambda$  після припинення корекції супутника. Залежності (3) і (4) наведені на рис. 3 і 4.

Рис. 3. Залежність (3) між періодом і амплітудою головної гармоніки (1) для пасивних геостационарних супутників типу  $l_1$

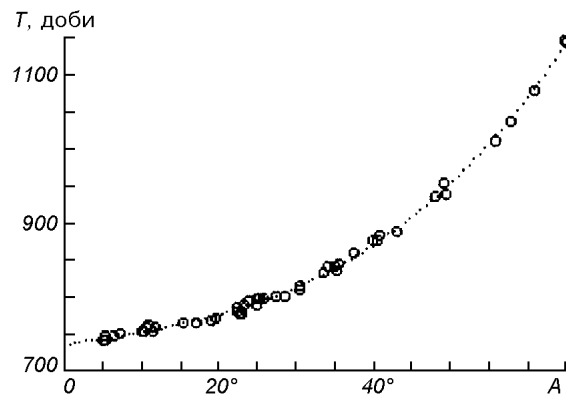
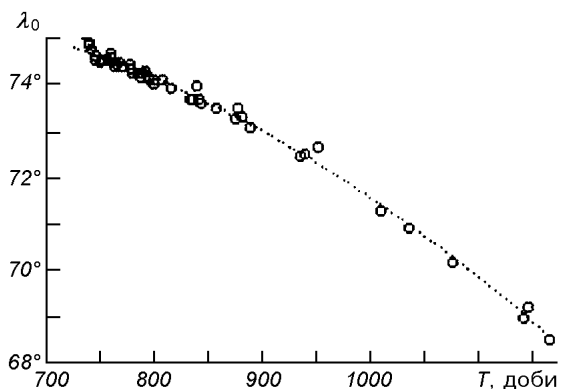


Рис. 4. Залежність (4) між  $\lambda_0$  і періодом головної гармоніки для супутників типу  $l_1$



Кружками на рисунках зображені ті значення параметрів, за якими будувались пунктирні криві методом найменших квадратів. Середні квадратичні відхилення каталожних даних від кривих (2)—(4) становлять відповідно  $\Delta A = \pm 0.17^\circ$ ,  $\Delta T = \pm 4$  доби,  $\Delta \lambda_0 = \pm 0.11^\circ$ . Амплітуду  $A$  можна визначити за значенням довготи підсупутникової точки  $\lambda_m$  для крайнього східного положення супутника по формулі (2). За формулами (3) і (4) обраховуються період  $T$  і довгота  $\lambda_0$ . Згідно з (1)  $\lambda_m = \lambda_0 - A$ .

Співвідношення (1) разом із співвідношеннями (2)—(5) характеризує зміну довготи  $\lambda_m$  геостационарного супутника після припинення коректування в момент  $MJD_0$ . Порівняння результатів, одержаних із співвідношення (1) з результатами спостережень надає змогу з'ясувати питання щодо корекції супутника на даному інтервалі часу та визначити одержаний супутником імпульс в результаті корекції. Такі дослідження ефективні для супутників, які знаходяться на довготах від  $0^\circ$  до  $70^\circ$  і розташовані західніше від точки стійкої рівноваги  $75^\circ$ . Зміну довготи  $\lambda$  таких супутників можна визначити з достатньою точністю основною гармонікою типу (1). При відсутності корекції такі супутники рухаються в земній системі координат як пасивні об'єкти, тобто на схід. Імпульс корекції повинен бути спрямований на захід в напрямку зменшення довгот.

Отже, зменшення довготи  $\lambda$  є ознакою корекції супутника. При збільшенні довготи  $\lambda$  необхідно її значення порівняти із значенням, одержаним із співвідношення (1). Значне розходження між ними є також ознакою корекції.

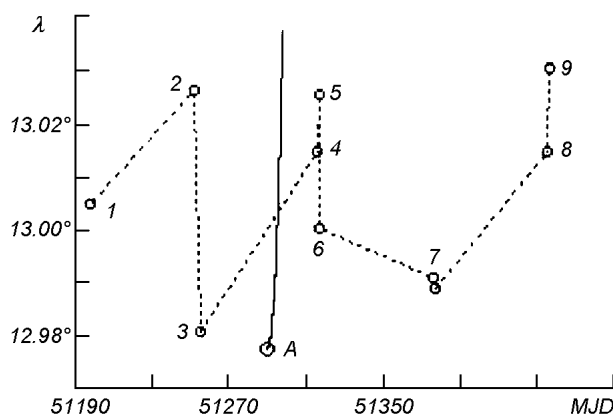


Рис. 5. Результати визначення дев'яти положень керованого супутника 96067A і його прогнозований рух при відсутності корекції

На рис. 5 наведені дев'ять положень керованого супутника 96067A «Hot Bird-2», який спостерігався в 1999 р. протягом дев'яти місяців [4]. Зміна довготи  $\lambda$  супутника наведена на рис. 5 пунктирними відрізками. Суцільною лінією подано прогнозовану зміну  $\lambda$  з часом при відсутності корекції. Точка А є початковою точкою кривої на момент  $MJD_0$ , коли супутник 96067A припинили коректувати. Видно, що лише на інтервалах 4—5 і 8—9 протягом однієї і двох діб (MJD 51315.90—51316.89; MJD 51434.91—51436.86) корекції не проводились. Корекція здійснювалась впродовж 1.5 год з MJD 51316.89 до MJD 51316.95 (інтервал 5—6).

За міжнародною угодою зміщення керованого геостационарного супутника вздовж орбіти відносно підсупутникової точки не повинно перевищувати  $0.1^\circ$ . Розрахунки за приведеними вище формулами показали, що супутник «Hot Bird-2» зміщується по довготі на  $0.1^\circ$  за 10 діб після

припинення його корекції. Отже, для утримання такого супутника на передбаченій довготі необхідно його коректувати кожні 10 днів.

Знайдемо величину імпульсу, яка необхідна для коригування супутника впродовж кожних 10 діб:

$$|Ft| = m|\Delta\lambda|R, \quad (6)$$

Маса кожного із супутників зв'язку серії «Hot Bird», які запускалися для ретрансляції телепередач на країни Європи, становить біля 3000 кг. Дрейф супутника за цей час змінився від нуля до значення, яке знаходиться за формулою

$$\dot{\lambda} = \frac{2\pi A}{T} \cos\left(\frac{2\pi \cdot \text{MJD}}{T}\right). \quad (7)$$

Співвідношення (7) знайдене диференціюванням виразу (1) при умові  $\varphi = 0^\circ$ . За співвідношеннями (2), (3), (6), (7) знаходимо, що зміна дрейфу супутника впродовж 10 діб становить  $|\Delta\dot{\lambda}| \approx 0.47$  град/доба, а імпульс  $|Ft| \approx 12000 \text{ Н}\cdot\text{с}$ .

На рис. 6 показана зміна довгот підсупутникових точок супутників 95016В «Hot Bird-1», 96067А «Hot Bird-2», 97049А «Hot Bird-3», 98013А «Hot Bird-4», 98057А «Hot Bird-5» протягом двох діб за результатами спостережень у вересні 1999 р. (прямі лінії) [4]. Штриховими лініями показано зміну довгот супутників для випадків: 1 — супутник на момент MJD 51435 перестав коректуватися і далі рухався як пасивний; 2 — остання корекція відбулася на одну добу раніше; 3 — корекція відбувалась на дві доби раніше; 4 — корекція відбувалась на п'ять діб раніше. Зауважимо, що супутники розташовані дуже близько один від одного і створюють «зону колокації» радіусом  $0.03^\circ$ .

Порівнюючи зміщення кожного супутника з кривими 1—4 на рис. 6, можна зробити висновок про те, що впродовж двох діб між спостереженнями корекції наведених п'яти супутників не здійснювались. Корекція супутника «Hot Bird-1» відбулась перед спостереженням (крива 1), «Hot Bird-4» за одну добу до першого спостереження (крива 2), «Hot Bird-3» за дві доби до першого спостереження (крива 3), «Hot Bird-5» за п'ять діб до першого спостереження (крива 4). На проміжку часу від двох до п'яти діб здійснювалась корекція лише супутника «Hot Bird-2».

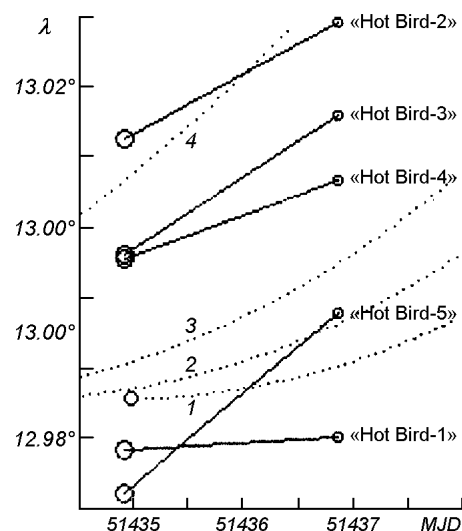


Рис. 6. Зміна довготи супутників серії «Hot Bird» протягом двох діб за результатами спостережень в 1999 р.

1. *Вершков А. Н.* Электронная версия каталога орбит геостационарных спутников // Наблюдения естеств. и искусств. объектов: Тез. — С.-Петербург: ИТА РАН, 1996.
2. *Демчик М. І., Кириченко А. Г., Кізюн Л. М. та ін.* Результаты спостережень і ототожнення геосинхронних космічних об'єктів // Космічна наука і технологія. Додаток до журналу.—1996.—2, № 1.—52 с.
3. *Кириченко А. Г., Кізюн Л. М., Демчик М. І. і ін.* Каталог GOCKU-2000 положень і елементів орбіт геосинхронних космічних об'єктів. Спостереження пасивних об'єктів з метою виявлення можливих зіткнень // Кинематика и физика небес. тел.—2002.—18, № 1.—С. 90—96.
4. *Кириченко А. Г., Кізюн Л. М., Клімук В. У. і ін.* Каталог положень, елементів орбіт геосинхронних космічних об'єктів GOCKU99 та особливості ототожнення активних геостационарных супутників // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—17, № 1.—С. 92—96.
5. *Кириченко А. Г., Клімук В. У.* Метод определения оскулирующих элементов орбиты геостационарных объектов по наблюдениям с одного пункта // Набл. искусств. небес. тел.—1994.—№ 88.—С. 36—38.
6. *Сочилина А. С., Киладзе Р. И., Григорьев К. В., Вершков А. Н.* Каталог орбит геостационарных спутников. — С.-Петербург: ИТА РАН, 1996.—103 с.
7. *Hernandez C., Jehn R.* Classification of geosynchronous objects. Issue 4. — Darmstadt: ESA/ESOC, 2002.—99 p.
8. *Kizyun L. M., Kirichenko A. G., Rudenko S. P., et al.* Catalogue GOCKU96 of positions and orbital elements of geosynchronous space objects observed in 1996 // Космічна наука і технологія. Додаток до журналу.—1998.—4, № 1.—52 p.

Надійшла до редакції 10.06.02