

УДК 521.9 (085)

А. Г. Кириченко<sup>1</sup>, Л. М. Кізюн<sup>2</sup>, М. І. Демчик<sup>1</sup>,  
В. У. Клімик<sup>1</sup>, К. А. Кудак<sup>1</sup>, Г. М. Мацо<sup>1</sup>, М. Р. Нестерук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету  
88000 Ужгород, вул. Далека 2а

<sup>2</sup>Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України  
03680 Київ МСП, вул. Академіка Заболотного 27

**Каталог ГОСКУ-2000 положень і елементів орбіт  
геосинхронних космічних об'єктів.  
Спостереження пасивних об'єктів  
з метою виявлення можливих зіткнень**

*Описано каталог ГОСКУ-2000 (Каталог геосинхронних об'єктів Київ—Ужгород), що містить топоцентричні екваторіальні координати та елементи орбіт геосинхронних супутників, визначених за фотографічними спостереженнями в Головній астрономічній обсерваторії НАН України і в Лабораторії космічних досліджень Ужгородського національного університету в 2000 р. (<http://www.mao.kiev.ua/ast/GEO2000/kat2000.htm>). Ототожнено 100 об'єктів за 1192 спостереженнями. Описується методика визначення залежностей екваторіальних координат, часового кута, довготи підсупутникової точки від MJD, а також методика розрахунку ефемерид для пасивних супутників на основі електронного каталогу. Для ілюстрації ефективності методик проведені розрахунки для дрейфуючого пасивного супутника 95045D.*

**КАТАЛОГ ПОЛОЖЕНИЙ И ЭЛЕМЕНТОВ ОРБИТ ГЕОСИНХРОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ГОСКУ-2000. НАБЛЮДЕНИЯ ПАССИВНЫХ ОБЪЕКТОВ С ЦЕЛЬЮ ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗМОЖНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ**, Кириченко А. Г., Кизюн Л. Н., Демчик М. И., Климик В. У., Кудак К. А., Мацо Г. М., Нестерук М. Р. — Описан каталог ГОСКУ-2000 (Каталог геосинхронных объектов Киев—Ужгород), содержащий топоцентрические экваториальные координаты и элементы орбиты геосинхронных спутников, полученных по фотографическим наблюдениям в Главной астрономической обсерватории НАН Украины и в Лаборатории космических исследований Ужгородского национального университета в 2000 году. (<http://www.mao.kiev.ua/ast/GEO2000/kat2000.htm>). Отождествлены 100 объектов по 1192 наблюдениям. Описывается методика определения зависимостей экваториальных координат, часового угла, долготы подспутниковой точки от MJD, а также методика расчета эфемерид

для пассивных спутников на основании электронного каталога. Для иллюстрации эффективности методик проведены расчеты для дрейфующего пассивного спутника 95045D.

*GOCKU-2000 CATALOGUE OF POSITIONS AND ORBITAL ELEMENTS OF THE GEOSYNCHRONOUS SPACE OBJECTS OBSERVED IN 2000. OBSERVATIONS OF UNCONTROLLED SPACE OBJECTS FOR THE PURPOSE OF DETECTING POSSIBLE COLLISIONS, by Kyrychenko A. H., Kizyun L. M., Demchyk M. I., Klimyk V. U., Kudak K. A., Matso H. M., Nesteruk M. R. — We describe the GOCKU-2000 Catalogue (Geosynchronous Objects Catalogue: Kyiv — Uzhhorod 2000) containing the topocentric equatorial coordinates and orbital elements of geosynchronous satellites obtained by the photographic method at the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Science of Ukraine and at the Space Research Laboratory of the Uzhgorod National University in 2000. (<http://www.mao.kiev.ua/ast/GEO2000/kat2000.htm>). The results of the identification of 100 objects from 1192 observations are presented. Using the electronic catalogue we determined the satellite ephemerides, the dependence of the equatorial coordinates, the time angle, and the longitude of subsatellite point on MJD for uncontrolled satellites. The corresponding calculations were carried out for the drifting uncontrolled satellite 95045D.*

Регулярні фотографічні спостереження проводились в 2000 р. в Лабораторії космічних досліджень Ужгородського національного університету (ЛКД УжНУ) на камері SBG ( $D = 43$  см,  $F = 0.76$  м) та в Головній астрономічній обсерваторії НАН України (ГАО НАНУ) на подвійному ширококутному астрографі ( $D = 40$  см,  $F = 2$  м) методами, описаними в [2, 8]. Спостереженнями охоплено інтервал довгот підсупутникових точок  $113^\circ: 32^\circ \text{ W} — 26^\circ \text{ E}$  протягом 29 лютого, 2—3 травня, 25 вересня (в ЛКД УжНУ), і  $19^\circ \text{ E} — 81^\circ \text{ E}$  протягом 1, 4 лютого, 1, 2 травня, 21, 23 серпня та 1, 2 жовтня (в ГАО НАНУ). Спостереження виконувались без використання ефемерид. Телескопи виставлялись по часовому куту в зону екватора, де знаходяться переважно керовані геосинхронні супутники. Загальна кількість спостережуваних об'єктів приведена в табл. 1. Десять об'єктів із загальної кількості 128 були сфотографовані на обох станціях.

Каталог складається з двох таблиць, в яких приведені екваторіальні координати геосинхронних об'єктів в системі каталогу PRM на епоху J2000.0. Для кожного ідентифікованого об'єкта подані його назва, номер по міжнародному каталогу, тип об'єкта, довгота підсупутникової точки, дрейф по довготі та нахил орбіти супутника до екватора Землі. Для неідентифікованих об'єктів при наявності більше ніж двох спостережень приведе-

Таблиця 1. Загальна кількість спостережених об'єктів

Тип об'єкта	Київ	Ужгород
	Ототожнені	
Активні	35	59
Пасивні	—	4
Невідомого типу	2	—
	Неототожнені	
Активні	—	—
Пасивні	2	1
Невідомого типу	23	2
Всього	62	66

на 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 ЛКД УжНУ [4].

Ототожнення спостережених об'єктів проводилось шляхом порівняння обчислених елементів орбіт з поданими в міжнародних каталогах геосинхронних об'єктів [9]. На 2000 р. міжнародні каталоги містять близько 750 геосинхронних об'єктів, розміром понад 1 м, які можна спостерігати фотографічним методом. Серед спостережених об'єктів є такі, що відсутні в згаданих каталогах.

Проблема спостережень пасивних об'єктів вже розглядалась в роботі [3]. Необхідність дослідження руху пасивних об'єктів обумовлена можливим зіткненням їх з керованими об'єктами. Для визначення ймовірності зіткнення на геосинхронних орбітах можна застосувати методику, яка використовується для низьких орбіт [6]. Суть її полягає в розрахунку параметрів руху об'єктів і виявленні зближення їх на кожний момент часу. Цей спосіб надає можливість визначати також найзручніший час спостереження пасивних супутників, часовий кут і схилення, а також розраховувати ефемериди для спостережень. Для цього можна використати електронну версію каталога геосинхронних об'єктів [1]. В каталозі подані значення елементів орбіти пасивних супутників, віднесені до екваторіальної площини та площини Лапласа протягом  $MJD$  49000—51000 з інтервалом в 20—30 днів. Всі елементи орбіт і довгота супутника добре подаються сумою лінійних і періодичних складових [5], величини яких суттєво відрізняються для значень нахилів орбіт поблизу  $0^\circ$  і  $180^\circ$ . Представлення елементів орбіт функціями часу надає можливість екстраполювати їхні значення на два-три роки вперед.

Використовуючи елементи орбіти супутників з електронного каталогу, ми отримали їхні прямокутні координати, а потім екваторіальні координати та часовий кут в залежності від  $MJD$ . На рис. 1, 2 приведені значення довгот  $\lambda$  і схилень  $\delta$  супутника 95045D в залежності від  $MJD$ .

Точками на рис. 2 зображено зміну часового кута супутника для Ужгорода. Аналіз цих кривих і відповідних їм таблиць показує, що супутник можна спостерігати в Ужгороді і Києві майже три місяці приблизно через кожних 2.2 роки. Найкращі умови для спостережень цього супутника в ЛКД УжНУ будуть в період  $MJD$  52640—52744 при схиленнях  $-6.3^\circ \leq \delta \leq -3.3^\circ$ , а в ГАО НАНУ в період  $MJD$  52534—52652 при схиленнях  $-9.1^\circ \leq \delta \leq -6.0^\circ$ . Зміна величини дрейфу супутника 95045D приведена на рис. 3. Кружками показано, як змінюється довгота супутника з електрон-

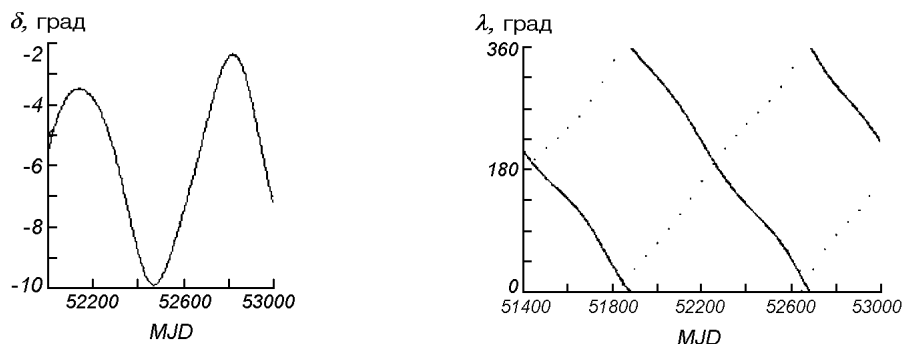


Рис. 1. Прогноз зміни схилення пасивного супутника 95045D

Рис. 2. Прогноз зміни довготи (суцільна лінія) і часового кута (точки) пасивного супутника 95045D

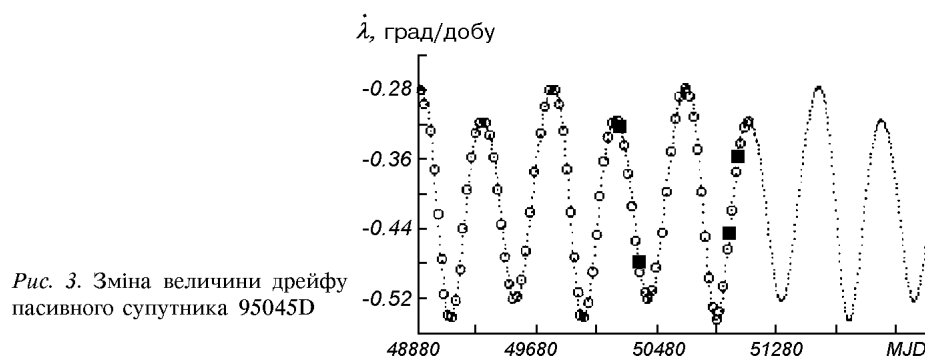


Рис. 3. Зміна величини дрейфу пасивного супутника 95045D

ного каталога геосинхронних об'єктів [1]. Пунктирна крива — апроксимація значень  $\dot{\lambda}$  сумою чотирьох гармонік. Чотири точки — дані наших реальних спостережень [2, 3].

Використання наведеної методики надає змогу підвищити ефективність спостережень пасивних супутників, коректувати прогноз видимості супутника, контролювати їхній рух, оцінювати ризик зіткнення на геосинхронних орбітах.

Розглянемо тепер особливості руху пасивних геосинхронних супутників детально.

Внаслідок асиметрії гравітаційного поля Землі, яка характеризується тесеральними і секторіальними гармоніками третього порядку, для некерованого геосинхронного об'єкта в залежності від початкових умов властивий такий режим руху [7].

1. Проста лібрація навколо найближчого стійкого положення (супутники типу  $l_1, l_2$ ).

2. Комплексна лібрація навколо двох стійких точок ( $l_3$ ).

3. Циркуляція з різними величинами дрейфу ( $d_1, d_2, d_3$ ).

Стійких положень лібраційні супутники набувають поблизу довгот  $75^\circ$  і  $255^\circ$ . Через місячні і сонячні збурення деякі супутники можуть змінювати режим руху: комплексна лібрація переходить в просту лібрацію або циркуляцію, і навпаки — супутник переходить з режиму руху 1 або 3 в режим 2. Згідно з каталогом [1] кількість супутників, які рухаються в режимі 1, 2, 3, становить відповідно 80, 5, 279.

При простій лібрації зміна довготи підсупутникової точки  $\lambda$  подібна до синусоїдальної:

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

з періодом  $T$ , який змінюється від 700 до 1900 діб. Лібрація відбувається навколо положення супутника з довготою  $\lambda_0$ .

На рис. 4 приведені каталожні значення довготи підсупутникової точки з [1] для супутника 95063D типу  $l_1$  і згладжена крива за (1), знайдена методом найменших квадратів ( $A = 66.85^\circ$ ,  $T = 1166^d$ ,  $\varphi = 183.8^\circ$ ,  $\lambda_0 = 68.4^\circ$ ). Горизонтальні суцільні прямі виділяють ті довготи  $\lambda$ , на яких можливі спостереження об'єкта в ГАО НАНУ, горизонтальна пунктирна пряма вказує на максимальне значення  $\lambda$  для спостережень в ЛКД УжНУ, а окрема точка є результатом спостережень в ЛКД УжНУ. Реальні криві зміни  $\lambda$  всіх супутників, які рухаються в режимі простої лібрації, відрізняються від отриманих за співвідношенням (1) дещо згладженими вершинами.

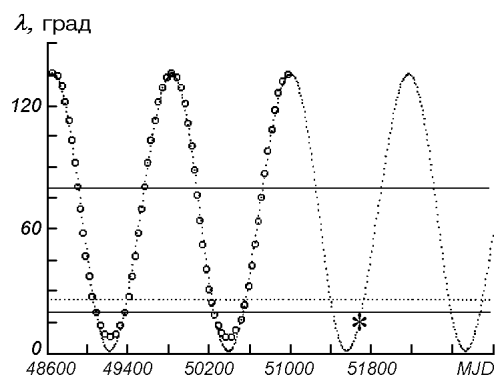


Рис. 4. Зміна довготи підсупутникової точки супутника 95063D на проміжку MJD 48645-50973 і її прогноз до MJD 53000

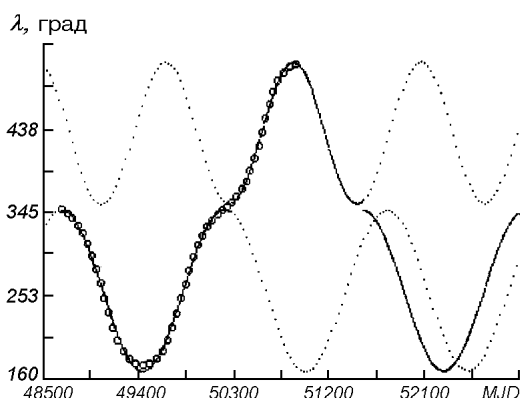


Рис. 5. Лібрація супутника типу  $l_3$

Зауважимо, що дрейф супутника можна знайти, продиференціювавши співвідношення (1).

Складнішим є рух супутника в режимі 2 — комплексної лібрації. На рис. 5 кружками зображені значення довгот супутника 91064A типу  $l_3$  за каталогом [1]. Приблизно до моменту  $MJD$  50200 довгота підсупутникової точки змінювалася синусоїдально — лібрація навколо точки  $\lambda_0$ :

$$\lambda = A_1 \sin\left(\frac{2\pi \cdot MJD}{T_1} + \varphi_1\right) + \lambda_0. \quad (2)$$

Надалі приблизно до  $MJD$  51400 рух супутника можна розглядати як лібрацію відносно точки  $\Lambda_0$ :

$$\lambda = A_2 \sin\left(\frac{2\pi \cdot MJD}{T_2} + \varphi_2\right) + \Lambda_0. \quad (3)$$

Таблиця 2. Параметри співвідношень (2) і (3) для супутника 91064A

Вираз	A, град	T, дб	$\varphi$ , град	$\lambda_0$ ( $\Lambda_0$ ), град
(2)	89.0	1536.2	203.1	257.9
(3)	77.5	1206.3	32.1	71.6

Після  $MJD$  51400 довгота підсупутникової точки знову змінюється за співвідношенням (2), але в іншій фазі. Криві типу (2) і (3) приведені на рис. 5 пунктиром. Значення параметрів співвідношень (2) і (3) для супутника 91064A, знайдені методом найменших квадратів, подано в табл. 2.

Зміну довготи  $\lambda$  супутника можна подати співвідношенням

$$\lambda = A_1 \sin \left( \frac{2\pi \cdot MJD}{T_1} + \varphi_1 - k \frac{2\pi(T_2 + 2d)}{T_1} \right) + \lambda_0 \quad (4)$$

в інтервалах

$$MJD_0 + k(T_1 + d) + k(T_2 + d) \leq MJD < \\ < MJD_0 + (k + 1)(T_1 + d) + k(T_2 + d),$$

та

$$\lambda = A_2 \sin \left( \frac{2\pi \cdot MJD}{T_2} + \varphi_2 - k \frac{2\pi(T_1 + 2d)}{T_2} \right) + \Lambda_0$$

в інтервалах

$$MJD_0 + (k + 1)(T_1 + d) + k(T_2 + d) \leq MJD < \\ < MJD_0 + (k + 1)(T_1 + d) + (k + 1)(T_2 + d),$$

де  $k = 0, 1, 2, \dots$

Значення  $d = 43.8^d$  і є тим інтервалом часу, який необхідний супутнику для переходу від лібрації відносно одного стійкого положення до лібрації відносно іншого стійкого положення. Відстань по довготі  $\lambda$ , на яку супутник за цей час повинен переміститися (відстань між синусоїдами), становить  $7.2^\circ$ .

За початковий момент відліку довгот супутника 91064A можна вибрати  $MJD_0 \approx MJD$  48600. Для точного визначення цього часу з рівняння

$$\frac{2\pi \cdot MJD_0}{T_1} + \varphi_1 = \frac{\pi}{2} + 2\pi n$$

визначається значення  $n = 31.95$ , яке округляється до цілого числа, і з наведеного ж рівняння знаходиться точне значення  $MJD_0 = 48674.8$ .

Графічне представлення (4) подане на рис. 5 суцільною лінією. Очевидно, що резонансний період супутника типу  $l_3$  приблизно в два рази більший від періодів лібраційних супутників інших типів і дорівнює  $T_1 + T_2 + 2d$ . Дрейф супутника можна визначити диференціюванням (4).

Довгота дрейфуючих супутників характеризується лінійною складовою та добутком двох періодичних складових:

$$\lambda = ax + b + \prod_{i=1}^2 \left[ A_i \sin \left( \frac{2\pi x}{T_i} + \varphi_i \right) + \lambda_{0i} \right], \quad (5)$$

Таблиця 3. Оцінки параметрів співвідношення (5) для супутника 95045D

Гармоніка	$A_i$ , град	$T_i$ , дб	$\varphi_i$ , град	$\lambda_{0i}$ , град
I	8.23	443.316	264.8	-0.0007
II	0.28	871.047	26.0	0.97

де через  $x$  позначена змінна величина  $MJD$ . Графічно така залежність для дрейфуючого супутника 95045D ( $d_3$ ) приведена на рис. 2. Всі коефіцієнти в (5) визначаються методом найменших квадратів. Кутовий коефіцієнт  $a$  повинен бути таким, щоб залишок  $\lambda - (ax + b)$  містив лише періодичну складову. Цього можна досягти, застосувавши ще раз спосіб найменших квадратів для лінійної складової до масиву даних, з якого вилучили основну гармоніку. Друга гармоніка лише змінює амплітуду коливань, для неї  $\lambda_{02} \approx 1$ ,  $A_2 < A_1$ ,  $T_2 \approx 2T_1$ . Основна гармоніка має параметр  $\lambda_{01} \approx 0$ . В табл. 3 наводяться оцінки параметрів співвідношення (5) для супутника 95045D ( $a = -0.4057$ ,  $b = 19995.59$ ).

Дрейф супутників типу  $d$  (рис. 3) є періодичною кривою, вісь якої  $\dot{\lambda} \approx a$ . Для супутників з великим дрейфом (тип  $d_1$ ,  $d_2$ ) періодичними складовими можна нехтувати і наближено прийняти  $\dot{\lambda} \approx a$ .

Прогнозування  $\lambda$  і  $\dot{\lambda}$  за наведеними співвідношеннями (1)–(5) надають можливість знаходити довготні інтервали видимості супутника в даному пункті спостережень, проводити ототожнення супутників з великим дрейфом. За результатами спостережень можливе уточнення параметрів руху супутників та інше.

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. и др.* 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 положень та елементів орбіт геосинхронних космічних об'єктів GOCKU 1997—1998. Проблема спостережень пасивних об'єктів. // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 4.—С. 381—384.
4. *Кириченко А. Г., Клімич В. У.* Метод определения оскулирующих элементов орбиты геостационарных объектов по наблюдениях с одного пункта. // Набл. искусств. небес. тел.—1994.—88.—С. 36—38.
5. *Кириченко А. Г., Клімич В. У., Кудак К. А.* Використання спостережень геосинхронних супутників для вирішення наукових задач і контролю забруднення космічного простору // Кинематика и физика небес. тел. Приложение.—1999.—№ 1.—С. 103—105.
6. *Хуторовский З. Н.* Риск столкновения космических объектов на низких высотах // Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор): Сб. науч. тр. / Под ред. А. Г. Масевич. — М.: ИА РАН, 1995.—С. 19—91.
7. *Kiladze R. I., Sochilina A. S.* On orbital evolution of geostationary satellites (poster contribution) // IAU Colloquium 165, July 1–5, 1996, Poznan, Poland. — Poznan, 1996.— P. 58—59.
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, N 1.—52 p.
9. Log of objects near the geostationary ring. Issue 21, 2000. ESA/ESOC.

Надійшла до редакції 13.11.01