

ТОЧНІСТЬ ОРБІТ НЕКЕРОВАНИХ СУПУТНИКІВ В КАТАЛОГАХ ГЕОСИНХРОННИХ ОБ'ЄКТІВ ESA

В.П. Єпішев, І.І. Мотрунич, В.У. Клімик, Г.М. Мацо

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

Дана оцінка точності орбіт дрейфуючих супутників в 5 останніх випусках каталогів геосинхронних об'єктів ESA. Точність визначалась величиною нев'язок в положеннях об'єктів, обчислених за двома різними випусками каталога. Виявлені помилки в орбітах лібраційних супутників шляхом порівняння з результатами спостережень. Визначено ймовірності зіткнення на геостационарній орбіті в останні 5 років і дано їх прогноз в найближчі роки за даними каталогів ESA.

Вступ

Освоєння геосинхронних орбіт космічними апаратами почалося в 1965 – 1966 роках, і вже на початку 2008 року таких об'єктів в каталозі Європейського космічного агентства (ESA) налічувалось 1150. Близько третини з них – це керовані супутники. В каталогах ESA значна увага приділяється класифікації об'єктів, екології зони геостационарних супутників. Основним джерелом інформації для каталогів ESA є двохточкові спостереження НАСА (США), приблизно 1 спостереження кожного супутника за тиждень. В передмові каталога вказується, що точність приведених в ньому орбіт обмежена, так як дані визначаються пасивними датчиками. З огляду на це постає питання, чи коректно використовувати орбіти каталогів ESA для ототожнення спостережень, оцінки ризику зіткнення на геосинхронних орбітах. Для дослідження використано останні 5 випусків каталога ESA [1 – 5]. Такі каталоги виходять щороку в січні – лютому. Орбіти в них приводяться за даними спостережень попереднього року на кінець грудня.

Дрейфуючі супутники

Кількість дрейфуючих некерованих супутників в каталогах ESA за 2004 – 2007

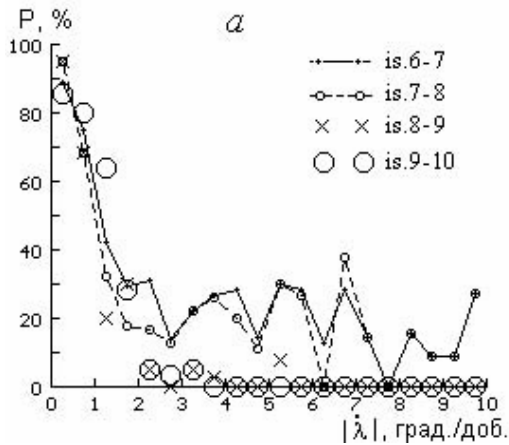
роки збільшилася з 390 до 458. Для оцінки точності їх орбіт бралися пари випусків каталога, що вийшли з інтервалом 1 рік. Рух (зміну географічних координат підсупутникової точки) дрейфуючого супутника в інтервалі 1 року визначався так, щоб центр цього інтервалу приходився на епоху наступного з цих каталогів. Рух оцінювали за елементами орбіт першого і другого каталогів. За двома кривими отримані величини середніх на річному інтервалі нев'язок географічних довгот $|\Delta\lambda|$ і широт $|\Delta\varphi|$ супутників. Якщо для певного супутника $|\Delta\lambda| > 10^\circ$, то приведені елементи орбіти в одному з цих каталогів вважалися промахом; їх не можна використовувати в прикладних задачах. Кількість промахів залежить від величини дрейфу супутників $|\dot{\lambda}|$. Ця залежність приведена на рис.1.

В інтервалі $0 < |\dot{\lambda}| < 2^\circ/\text{д}$ кількість промахів швидко спадає, майже з 100%, при збільшенні величини дрейфу. Далі, в інтервалі $2 < |\dot{\lambda}| < 15^\circ/\text{д}$, їх кількість змінюється мало і не перевищує 30 – 40 % в 6 – 7 випусках каталога ESA. В 8 – 10 випусках промахи в цьому інтервалі майже відсутні. Для супутників з $|\dot{\lambda}| > 15^\circ/\text{д}$ процент промахів знову більший, але супутників з таким великим дрейфом є небагато.

Обернена кореляційна залежність від величини дрейфу при не дуже великих $|\dot{\lambda}|$

виконується і для величин нев'язок $|\Delta\lambda|$, якщо відкинути промахи. Для випусків 6 – 7 каталога ESA цю залежність (рис.2) можна виразити функцією:

$$|\Delta\lambda| = 4.1986 \cdot \frac{1}{|\dot{\lambda}|} + 1.86. \quad (1)$$



Залежність (1) знайдена як регресія $|\Delta\lambda|$ від величини $1/|\dot{\lambda}|$. Коефіцієнт регресії $\rho = 0.60$. Для слідуючих пар випусків (7-8, 8-9, 9-10) каталога ESA цей коефіцієнт відповідно рівний: 0.55; 0.48; 0.38. Він зменшується з підвищенням точності каталогів.

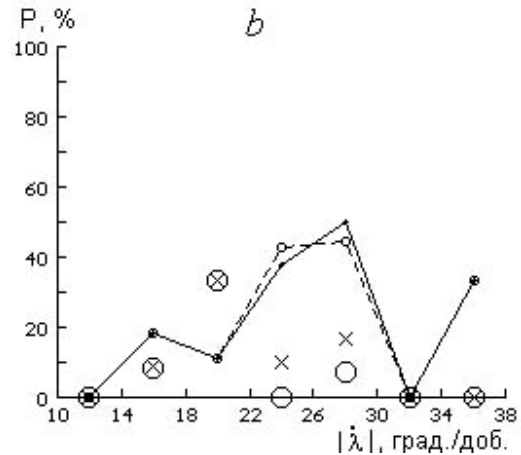


Рис.1. Процент промахів дрейфуючих супутників (a) з порівняно невеликим дрейфом на інтервалах розбиття $\Delta|\dot{\lambda}| = 0.5^\circ/\text{д}$ і (b) супутників з великим дрейфом на інтервалах розбиття $\Delta|\dot{\lambda}| = 4.0^\circ/\text{д}$ при порівнянні географічних довгот супутників в інтервалі 1 року, знайдених за каталогами ESA двох випусків: 6-7 вип., 7-8, 8-9 і 9-10.

Кореляція нев'язок географічних широт $|\Delta\varphi|$ слаба. В різних випадках коефіцієнт кореляції може бути додатнім і від'ємним.

Розподіл нев'язок $|\Delta\lambda|$ і $|\Delta\varphi|$ за величиною мало відрізняється в різних парах випусків каталогів (рис.3). Густина розподілів спочатку швидко зростають. В інтервалі $1^\circ - 2^\circ$ для нев'язок $|\Delta\lambda|$ і інтервалі $0.1^\circ - 0.3^\circ$ для нев'язок $|\Delta\varphi|$ приймають максимальне значення. Далі майже рівномірно спадають до нуля.

Лібраційні супутники типу L3

Мінімальна величина дрейфу супутників, що рухаються в режимі дрейфуючих об'єктів, в певні проміжки часу може досягати $0.15^\circ - 0.20^\circ$ за добу. При зменшенні величини дрейфу супутник починає рухатися як лібраційний типу L3. Його дрейф змінюється в межах від -0.4° до $+0.4^\circ$ за добу. Ще в менших межах змінюється дрейф супутників типу L1, L2.

Беручи до уваги вид кривих на рис.1a, можна зробити висновок, що орбіти лібраційних супутників в усіх випусках каталогів ESA в майже 100% випадків є

промахами. Покажемо що це дійсно так для орбіт лібраційних супутників типу L3. З усіх 17 таких об'єктів, приведених у 10 випуску каталога ESA, розглянемо лише ті 8 “найстаріших” некерованих супутників, які приводяться і в російському каталозі на 1996 рік [6]. Для супутників L3 в каталогах ESA приводяться всі значення λ , отримані за даними спостережень в NASA.

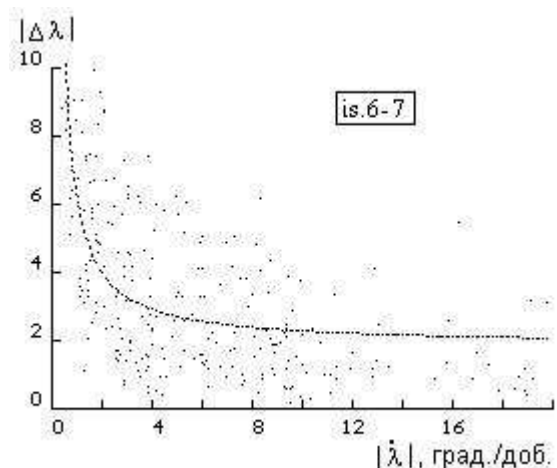


Рис.2. Кореляційна залежність величин нев'язок $|\Delta\lambda|$ від дрейфу $|\dot{\lambda}|$ супутника.

Отже, на весь час існування кожного з цих супутників, як лібраційних об'єктів

типу L3, можна побудувати по три криві зміни географічної довготи: експериментальна крива, зміна довготи за елементами орбіти в каталозі ESA (10

випуск) і за даними російського каталога на 1996 рік. Ці криві для 8 супутників приведені на рис.4.

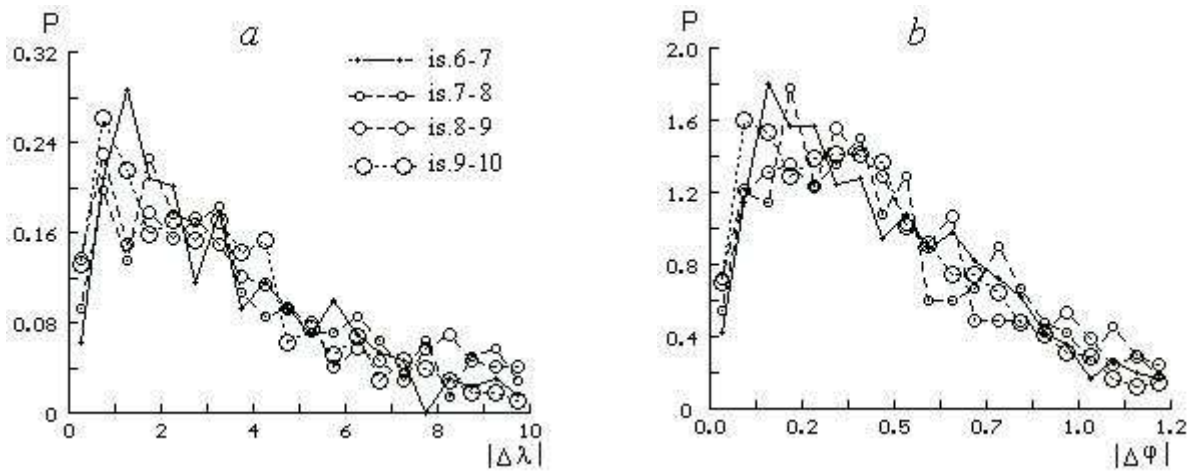


Рис.3. Густина розподілів кількості нев'язок $|\Delta\lambda|$ (a) і кількості нев'язок $|\Delta\varphi|$ (b) за їх величиною при порівнянні географічних координат дрейфуючих супутників в інтервалі 1 року, знайдених за каталогами ESA двох випусків: 6-7 вип., 7-8, 8-9 і 9-10.

В усіх кривих за каталогом ESA (пунктирні лінії) з експериментальними кривими (кружечки) є по одній спільній точці – на кінець грудня 2007 року (епоха каталога). Всі криві, отримані за каталогом ESA, – це зміна положення об'єктів типу

L1 (супутник 3 і 8 на рис.4), L2 (супутник 1, 5, 6 і 7), дрейфуючих об'єктів (супутник 2), і лише одна крива (91064A) відповідає рухові супутника типу L3, яка, в той же час, виявляється також промахом при порівнянні з експериментальною кривою.

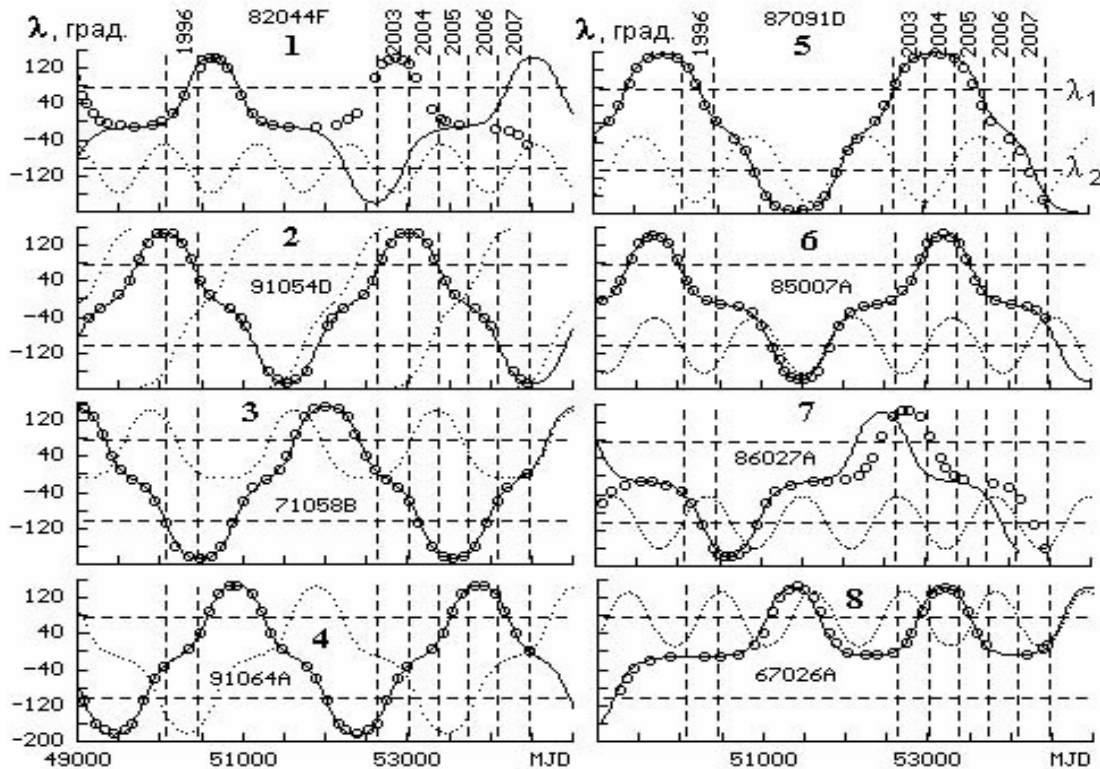


Рис.4. Зміна довготи підсупутникової точки в інтервалі MJD 49000 – 55000 деяких нестійких супутників: точки (кружечки) – результати спостережень в NASA; суцільні криві – розрахунки за даними російського каталога на 1996 р.; пунктирні криві – за даними каталога ESA на кінець 2007 року.

Виходячи з приведених в каталозі ESA (вип. 10) кривих спостережень, слід з списку 17 об'єктів типу L3 віднести до типу L1 або L2. Один з них – це 8-й супутник на рис.4, який ще довго буде рухатися, як об'єкт типу L1. Еволюція орбіти цього об'єкта досліджена в [7]. Перехід його через $\lambda = -10^\circ$ можливий лише при максимальному нахилі орбіти, як це було в 1995 – 1997 роках

Експериментальні криві добре узгоджуються з кривими, отриманими за російським каталогом на 1996 рік (суцільними лініями на рис.4), крім випадку 1 (супутник 82044F) і 7 (86027A), де криві співпадають лише до моменту досягнення нестійкої точки. Досить дуже малої похибки в елементах орбіти або розрахунках, щоб після проходження нестійкої точки знайдена крива помітно відрізнялася від спостережуваної.

Оцінка ризику зіткнення на геостаціонарній орбіті за каталогами ESA

Для дослідження ризику зіткнення на геостаціонарній орбіті (ГЕО) в останні 5 років нами використано 4 випуски (6 – 9) каталога ESA. За даними кожного з цих каталогів побудовано криві зміни ймовірностей зіткнення активних геостаціонарних супутників (ГС) з некерованими геосинхронними об'єктами (НГО) в інтервалі 2 роки так, щоб епоха каталога знаходилась приблизно в центрі цього інтервалу. В розрахунках використовували всі дрейфуючі НГО з відповідного каталога, крім деяких супутників, орбіти яких знаходяться далеко за межами ГЕО (не ближче 900 км).

Відповідні криві на рис.5 позначені цифрами 6, 7, 8, 9. Епохи каталогів позначені 4 штрихами на вісі часу. Сильний максимум останньої кривої зумовлений НГО 97016A (Thaicom 3), його час приблизно співпадає з епохою каталога [4]. Цей тайландський супутник вичерпав свій ресурс в 2006 році, але його не вдалось вивести за межі зони активних ГС. Орбіта його виявилася дуже небезпечною для активних ГС: дрейф $-5.5\%/d$, нахил

орбіти $i = 0.3^\circ$, відстань до ГЕО змінюється в межах від 57 до 814 км. Елементи орбіти цього супутника в 9-му випуску каталога ESA досить точні. При порівнянні з 10 випуском каталога ESA середні нев'язки в положеннях цього супутника склали $|\Delta\lambda| = 1.85^\circ$ і $|\Delta\phi| = 0.07^\circ$.

Невдача з виведенням на “двинтар” супутника Thaicom 3 привела до збільшення ризику зіткнення на ГЕО в 4 рази: середня ймовірність зіткнення за добу в інтервалі MJD 53000 – 53950 $P = 0.24 \cdot 10^{-8}$, в межах максимальної точки (MJD 53950 – 54050) $P = 0.97 \cdot 10^{-8}$. Рух супутника Thaicom 3 в 2006 – 2007 рр. моделює ситуацію з поверненням площини орбіти небезпечних НГО в площину екватора. Та в останньому випадку ріст ризику зіткнення розтягується на тривалий час внаслідок великої кількості супутників з нахилом орбіти, близьким до нуля.

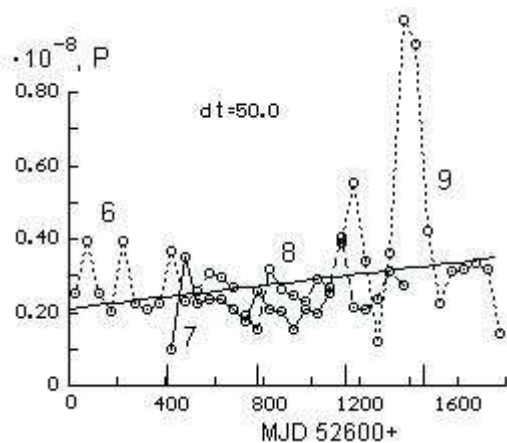


Рис.5. Зміна ймовірності зіткнення на ГЕО за добу на інтервалі ~5 років (2002–2007рр.) за даними чотирьох випусків каталога ESA.

Ймовірності розраховувалися, як середні на інтервалі 50 діб за прямим методом [8, 9]. Вони на рис.5 позначені точками (кружечками). За цими точками встановлено лінійну регресію (рис.5):

$$P = (0.00007840 \cdot t - 3.913) \cdot 10^{-8}, \quad (2)$$

де P – середня ймовірність зіткнення на ГЕО за добу, t – час в MJD. Коефіцієнт кореляції $\rho = 0.22$. З (2) випливає, що за останні 5 років ймовірність зіткнення НГО с активними ГС збільшилася приблизно в 1.7 рази: з $0.21 \cdot 10^{-8}$ до $0.35 \cdot 10^{-8}$. Збільшення пояснюється, в основному, невдачами з виведенням відпрацьованих

супутників вище зони ГЕО і тільки в незначній мірі збільшенням кількості геосинхронних об'єктів.

За даними 4 каталогів середнє за 5 років значення ймовірності зіткнення на ГЕО за рік $P_{\text{рік}} = 1.1 \cdot 10^{-6} \pm 0.5 \cdot 10^{-6}$.

Дані каталога ESA [4] використано також для прогнозу ризику зіткнення на ГЕО впродовж 1800 діб: 2011 – 2015 рр. (рис.6, крива 1). Крива 2 (рис.6), що виражає зміну ймовірності зіткнення на протязі 2003 – 2007 рр., знаходиться вище (вона отримана за точками на рис.5: два значення за даними різних каталогів на один і той самий момент часу усереднювались). Зменшення ризику зіткнення через 8 років можна пояснити тим, що з часом нахили орбіти супутників збільшуються, і вони перестають бути такими небезпечними.

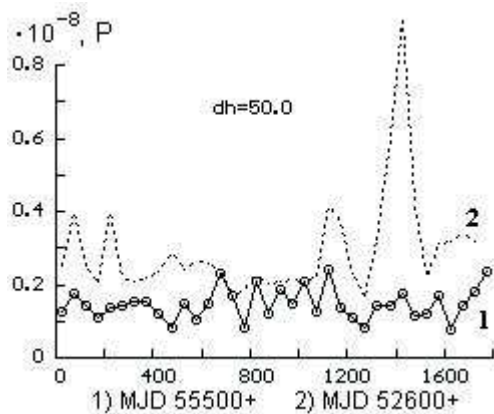


Рис.6. Прогноз зміни ймовірності зіткнення на ГЕО за добу на інтервалі 2010–2015 рр. (1) і зміни ймовірності зіткнення на протязі 2002 – 2007 рр. за даними 4 каталогів ESA (2).

Відповідно даним, за якими будувались графіки, середнє за 5 років (2011 – 2015) значення ймовірності зіткнення на ГЕО за рік зменшиться до

$P_{\text{рік}} = 0.55 \cdot 10^{-6} \pm 0.15 \cdot 10^{-6}$, приблизно в 2 рази. В дійсності це може бути лише у випадку, якщо в слідуючі 8 років:

- 1) не збільшиться кількість активних ГС;
- 2) всі відпрацьовані супутники будуть виводитись за межі зони активних ГС;
- 3) не будуть траплятися аварії при запуску супутників.

Існує тенденція до уповільнення росту кількості небезпечних НГО, яку пояснюють тим, що задача виведення відпрацьованих супутників за межі зони ГЕО була поставлена лише 10 років назад, а середній ресурс активних супутників більший 10 років. Якщо в 2006 році з 20 супутників, що закінчили свій ресурс, вдалося вивести лише половину на «цвинтар», то в 2007 році вже тільки один відпрацьований об'єкт не був виведений за 300-кілометрову зону ГЕО.

Висновки

Найточнішими в каталогах ESA є орбіти дрейфуючих супутників з великим дрейфом, від 2° до 15° за добу. Каталоги з 8-го по 10 випуск майже не містять промахів в цих орбітах. Так як основний вклад в ризик зіткнення на ГЕО вносять дрейфуючі супутники з великим дрейфом, то каталоги ESA можна використовувати для наближеної оцінки ймовірності зіткнення. Результати, отримані за орбітами 6-го і 7-го випусків каталога ESA, незважаючи на меншу їх точність, мало відрізняються від величин ймовірностей зіткнення, визначених за даними його 8 і 9 випусків.

Література

1. Hernandez C., Jehn R. Classification of geosynchronous objects. – Issue 6. – Darmstadt: ESA ESOC, jan. 2004. – 110 p.
2. Serraller I., Jehn R. Classification of geosynchronous objects. – Issue 7. – Darmstadt: ESA ESOC, jan.2005. – 113 p.
3. Hernandez C., Jehn R. Classification of geosynchronous objects. – Issue 8. – Darmstadt: ESA ESOC, febr.2006. – 119 p.
4. Arregui J.P., Jehn R. Classification of geosynchronous objects. – Issue 9. – Darmstadt: ESA ESOC, febr.2007. – 119 p.

5. Choc R., Jehn R. Classification of geosynchronous objects. – Issue 10. – Darmstadt: ESA ESOC, febr. 2008. – 120 p.
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. Клімик В.У., Кудак К.А., Мацо А.М. // Наук. вісник Ужгород. університету. Серія Фізика. – Вип.12, – Ужгород: УжНУ, 2002. – С. 35-42.
8. Єпішев В.П., Мотрунич І.І., Клімик В.У. та ін. // Наук. вісник Ужгород. університету. Серія Фізика. – Вип.19, – Ужгород: УжНУ, 2006. – С. 181-187.
9. Єпішев В.П., Мотрунич І.І., Клімик В.У. // Космічна наука і технологія. – Т.13, № 1, – К.: НКАУ, НАНУ, 2007. – С. 49-53.

ACCURACY OF ORBITS OF UNGUIDED SATELLITES IN THE CATALOGUES OF GEOSYNCHRONOUS OBJECTS ESA

V.P. Yepishev, I.I. Motrunich, V.U. Klimyk, G.M. Matso

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

The estimation of accuracy of orbits of drifting satellites in last issues of the catalogues of geosynchronous objects ESA is given. The accuracy was determined by value of discrepancies in positions of objects calculated on two different issues of the catalogues. The errors in orbits of libration satellites are detected by matching with outcomes of observations. The probabilities of collision on geostationary orbit last five years are determined, the forecast the coming years under the data of the catalogues ESA is given.