

УДК 521.9 (085)

В. П. Єпішев, І. І. Мотрунич, В. У. Клімик

Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету, Ужгород

## Повернення орбіт геосинхронних об'єктів у площину екватора і ризик зіткнення на геостаціонарній орбіті

Надійшла до редакції 26.10.06

Досліджується зв'язок повернення орбіт некерованих геосинхронних об'єктів у площину екватора із ризиком зіткнень на геостаціонарній орбіті. При малих нахилах орбіти найнебезпечніших некерованих об'єктів ймовірність зіткнення може збільшитися в 3—6 разів, але залишиться дуже малою. Приводиться розподіл по довготі небезпечних ділянок геостаціонарної орбіти, встановлено його періодичність на достатньо великих проміжках часу. Ризик зіткнення по довготі може змінюватися в два рази.

### ВСТУП

Після припинення коректування активні геостаціонарні супутники (ГС) починають рухатися як некеровані геосинхронні об'єкти (НГО). Змінюється не тільки географічна довгота підсупутникової точки об'єкта, але й нахил орбіти. Повернення орбіти більшості НГО у площину екватора відбувається з періодом близько 53 роки. Перші ГС були запуснені у 1960 рр. Через кілька років їхні орбіти почнуть повертатися у площину екватора, що може становити загрозу зіткнення з активними ГС, які рухаються у цій площині. Актуальним стає дослідження впливу повернення орбіт НГО у площину екватора на ризик їхнього зіткнення з активними ГС.

### ЙМОВІРНІСТЬ ПЕРЕТИНУ ГЕОСТАЦІОНАРНОЇ ОРБИТИ НЕКЕРОВАНИМИ ГЕОСИНХРОННИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Під зоною геостаціонарних супутників будемо розуміти область, всі точки якої знаходяться від геостаціонарної орбіти на відстані  $r \leq 100$  км. Прослідкуємо рух НГО з каталогу на 1996 р.

[3], які можуть заходити в зону ГС. За розрахунками на період з 1990 по 1995 рр. таких НГО є 66. Сюди входять всі 16 супутників перших запусків (з 1966 по 1969 рр.). Визначення орбіт цих 66 НГО проводили на основі аналітичної теорії руху ГО, що враховує головні збурювальні ефекти гравітаційного походження: несферичність Землі, сили тяжіння Сонця і Місяця [1]. Програма складена так, що рух НГО визначався з точністю 2—3" на інтервалі до 30 діб. Для визначення точності обчислення орбіт на великих проміжках часу порівнювалися положення супутників протягом 2006 р., знайдені на основі каталогу 1996 р. [3], і їхні положення у 2006 р., обчислені на основі каталогу ESA 2006 р. [4]. Похибка обчислення екваторіальних координат НГО в інтервалі 10 р. дорівнювала 3—5° по  $\alpha$  і 0.5—1° по  $\delta$ .

Положення НГО визначали з кроком 0.01 доби. В процесі роботи програми у спеціальний файл (архів) заносились параметри небезпечних наближень НГО до геостаціонарної орбіти (до 100 км) [2, 5]. Дрейф небезпечних НГО може досягати 25° за добу, що відповідає зміщенню супутника в земній системі координат на 190 км за 0.01 доби. Проте вибраний крок є оптималь-

ним, бо його зменшення суттєво не змінює отриманих результатів.

З 1994 по 2028 рр. (MJD 49500—62000) за підрахунками відбудеться 6098 небезпечних наближень НГО до геостационарної орбіти. За цими даними побудовано емпіричну функцію густини розподілу відстані НГО до геостационарної орбіти при входженні супутника в зону геостационарних супутників.

Функція побудована за точками  $P = m/(n \cdot \Delta r)$ , де  $m/n$  — частота наближення НГО до  $i$ -го інтервалу довжиною  $\Delta r = 5$  км. Методом найменших квадратів побудована усереднена густина розподілу — поліном другого порядку:

$$P(r) = a_0 + a_1 r + a_2 r^2,$$

де  $a_0 = 5.6201 \cdot 10^{-3}$ ,  $a_1 = 1.1154 \cdot 10^{-4}$ ,  $a_2 = -3.5928 \cdot 10^{-7}$ . В інтервалі 0...100 км функція  $P(r)$  збільшується від 0.006 до 0.014. Середнє квадратичне відхилення точок від кривої  $\sigma = 0.001$ . Інтеграл від  $P(r)$  по всій області  $r$  (від 0 до 100 км) рівний 1 з точністю 0.0001. При збільшенні часового інтервалу архіву небезпечних наближень відхилення  $\sigma$  зменшується. Функція  $P(r)$  близька до реальної густини розподілу.

Середній діаметр геосинхронного супутника за каталогом [3] становить 8.15 м. Будемо вважати, що НГО проходить через геостационарну орбіту (перетинає її), якщо мінімальна відстань  $r$  від центра НГО до геостационарної орбіти не перевищує 8 м.

Ймовірність  $P_z$  проходження НГО через геостационарну орбіту при входженні в зону гео-

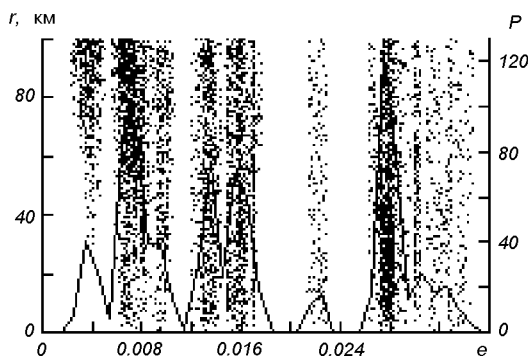


Рис. 1. Розподіл НГО по ексцентриситету  $e$  і відстані  $r$  до геостационарної орбіти при небезпечних наближеннях до неї за даними архіву в інтервалі 34 роки, 1994—2028 рр.

стационарних супутників визначається як інтеграл з функції густини у межах від 0 до 0.008 км. Для даного часового інтервалу

$$P_z = \int_0^{0.008} P(r) dr = 4.5 \cdot 10^{-5}.$$

Ймовірність перетину НГО геостационарної орбіти за 1 добу визначалась як середнє значення в інтервалі  $dt = 250$  діб. В часовому проміжку з 1995 по 2028 р. (MJD 50000—62000) вона перебуває у межах від 0.000015 до 0.000035.

На період з 1994 по 2028 р. найнебезпечнішими є супутники з нахилом орбіти від 10 до 18°. Це пояснюється тим, що супутники, які мають великий нахил орбіти, часто проходять через геостационарну орбіту внаслідок великих дрейфів. Такими є НГО 77034C (його середній дрейф  $\dot{\delta} = -17.0^\circ$  за добу, ексцентриситет  $e = 0.030$ ) і 78113D ( $\dot{\delta} = -22.9^\circ/d$ ,  $e = 0.028$ ). Ці, а також деякі інші небезпечні НГО, в 1990—1995 рр. мали нахил 10—13° і створювали сильний максимум кривої густини розподілу по нахилу орбіти в точці  $i = 11^\circ$ . Супутник 78113D є найнебезпечнішим для активних геостационарних супутників. Майже 20 % всіх небезпечних наближень на проміжку з 1994 по 2028 рр. — це наближення цього супутника до геостационарної орбіти на відстань до 100 км.

Більшість активних супутників мають ексцентриситет в межах від 0.0001 до 0.0005. Ексцентриситет небезпечних НГО значно більший. Неке-

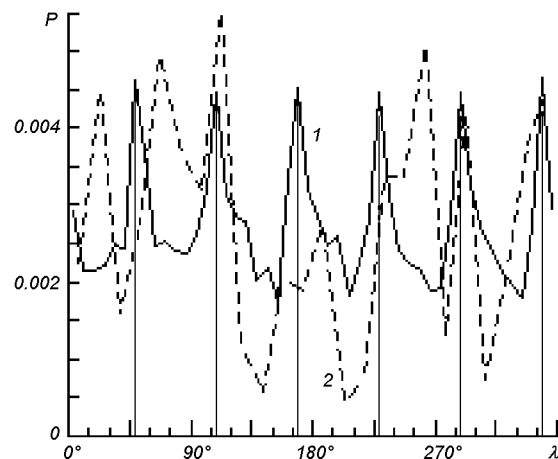


Рис. 2. Розподіл небезпечних наближень НГО до геостационарної орбіти по географічній довготі за даними архіву: 1 — в інтервалі 34 роки, 1994—2028 рр., 2 — в інтервалі 5.5 років, 1990—1995 рр.

ровані супутники з ексцентриситетом  $e < 0.005$  взагалі не наближаються до геостационарної орбіти ближче за 20 км. Це видно з рис. 1, де точки визначають ексцентриситет і мінімальну відстань до геостационарної орбіти при проходженні НГО через зону геостационарних супутників в проміжку з 1994 по 2028 рр. Крива на рис. 1 є розподілом частот  $P$  (приведених до одиничного інтервалу  $e$ ) небезпечних наближень НГО до геостационарної орбіти по ексцентриситету  $e$ . Максимум кривої з  $e = 0.004$  зумовлений небезпечними наближеннями на відстань від 30 до 100 км.

Для визначення найбезпечніших зон на геостационарній орбіті знайдено розподіл географічних довгот НГО у момент мінімальних наближень до геостационарної орбіти за даними архіву небезпечних наближень в інтервалі 34 роки, 1994—2028 рр. (рис. 2, крива 1). Область розбиття по довготі —  $7.5^\circ$ . Крива з точністю до деякої похибки періодична з періодом  $60^\circ$ , має гострі максимуми, їхні довготи показані пунктирними вертикальними лініями. Перший максимум знаходиться в точці  $\lambda \approx 50^\circ$ . Періодичність розподілу по довготі небезпечних наближень не спостерігалася в часовому інтервалі 1990—1995 рр. (рис. 2, штрихова крива).

Найнебезпечнішими для активних ГС є довготи  $\lambda \approx 50^\circ + 60^\circ \cdot n$  ( $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ ) і їхні околиці радіусом  $10^\circ$ . За межами цих довгот ризик зіткнення на геостационарній орбіті менший майже удвічі.

Через 10—20 р. не слід чекати різкого збільшення входжень НГО в зону активних ГО, зумовлених поверненням орбіти перших ГО у площину екватора. Але при малих кутах нахилу НГО під час кожного входження кількість зіткнень з активними супутниками може збільшуватись внаслідок довшого часу перебування їх у цій зоні.

**ПРОГНОЗ ЗМІНИ РИЗИКУ ЗІТКНЕННЯ  
НЕКЕРОВАНИХ ГЕОСИНХРОННИХ ОБ'ЄКТІВ  
З АКТИВНИМИ ГЕОСТАЦІОНАРНИМИ  
СУПУТНИКАМИ В ІНТЕРВАЛІ 5.5 РОКІВ  
ЧЕРЕЗ 27 РОКІВ**

Для дослідження ризику зіткнення супутників створено архів небезпечних зближень (до від-

стані 100 км) НГО з активними ГС в інтервалі 2017—2023 рр. (MJD 58000—60000). Положення активних ГС визначено за каталогом [3]. Наближено функцію густини розподілу відстані  $r$  між НГО і активним ГС при їхньому небезпечному зближенні можна виразити поліномом, знайденим за методом найменших квадратів:

$$P'(r) = 0.2011 \cdot 10^{-4} r + 27.32 \cdot 10^{-7} r^2.$$

Ймовірність  $P'_z$  зіткнення НГО з активним ГС при небезпечному зближенні визначається як інтеграл цієї функції у межах від нуля до довжини середнього діаметра об'єкта. Отримаємо:  $P'_z = 0.65 \cdot 10^{-9}$ . Використовуючи цю ймовірність і кількість небезпечних зближень НГО з активними ГО за добу, можна обчислити ймовірність зіткнення протягом доби.

На рис. 3 приведено криві зміни ймовірності зіткнення протягом доби НГО з активними супутниками на часовому проміжку 2000 діб: суцільна крива — в інтервалі MJD 58000—60000 (2017—2023 рр.), пунктирна крива — на час MJD 48000—50000 (1990—1995 рр.). Ймовірність обчислювалась як середнє значення на інтервалі 50 діб.

Протягом 1990—1995 рр. ймовірність змінювалась від  $0.005 \cdot 10^{-8}$  до  $0.035 \cdot 10^{-8}$ , протягом 2017—2023 рр. — від  $0.020 \cdot 10^{-8}$  до  $0.100 \cdot 10^{-8}$ . За 27 років вона збільшилась в 3—4 рази. Це збільшення ймовірності зумовлене поверненнями орбіт НГО перших запусків у площину екватора, вони мають відбутися в основному в 2014—2023 рр.

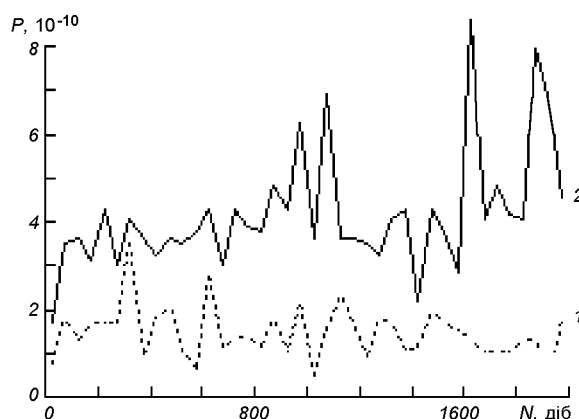


Рис. 3. Зміна ймовірності зіткнення НГО з активними ГО за добу за даними каталога 1996 р. в інтервалі 2000 діб

Значне збільшення ризику зіткнення за 27 років не становить загрози для активних ГО через дуже малу ймовірність зіткнення. У 2017—2023 рр. ймовірність зіткнення НГО з активними ГО за рік дуже мала, вона не перевищує  $3.7 \cdot 10^{-7}$ .

Внаслідок малих нахилів орбіт чотири супутники перших запусків 70055A, 68050J, 66053J, 67066G у 2017—2023 рр. будуть значно небезпечніші за ГО 78113D. 69 % всіх небезпечних зближень протягом 2017—2023 рр. спричинять саме вони. В 1990—1995 рр. такі зближення склали 36 %; НГО 78113D, 70055A, 68050J, 66053J, 67066G наближались на небезпечну відстань до активних ГО 121, 19, 16, 2, 45 разів відповідно.

#### ЗАЛЕЖНІСТЬ РИЗИКУ ЗІТКНЕННЯ НЕКЕРОВАНИХ ГЕОСИНХРОННИХ ОБ'ЄКТІВ З АКТИВНИМИ ГЕОСТАЦІОНАРНИМИ СУПУТНИКАМИ ВІД НАХИЛУ ОРБИТИ НГО В ІНТЕРВАЛІ 47 РОКІВ

Розглянемо рух цих п'яти НГО. Підрахунки відповідного інтегралу показують, що за даними архіву небезпечних зближень в 1995—2042 рр. (MJD 50000—67000) ймовірність зіткнення НГО 78113D, 70055A, 68050J, 66053J, 67066G з активними ГО при небезпечному зближенні складають  $P'_z = 1.6 \cdot 10^{-9}$ . Зміну ймовірності  $P$  їхнього зіткнення за добу з активними ГО на зазначеному проміжку показано на рис. 4. Ймовірність обчислювалася як середнє на інтервалі 250 діб. П'ять інших кривих на рис. 4 — це зміни нахилів орбіт  $i$ , обчислених для цих п'яти супутників за даними каталога [3] (шкала справа). П'ять точок на кривих зміни нахилу — це значення нахилів супутників на кінець грудня 2005 р. за каталогом Європейського космічного агентства [4].

Перший великий максимум зміни ймовірності (позначений на рис. 4 цифрами 5, 4) припадає на час MJD 56900 (2014 р.). Він приблизно збігається з часом повернення площин орбіт супутників 68050J, 66053J в екваторіальну площину. Наступні два великі максимуми зміни ймовірності зіткнення (точки 3 і 2) мають бути в 2020 р. і 2023 р. (MJD 59000, 60000) під час повернення орбіт НГО 70055A, 67066G у екваторіальну площину. Найбільша ймовірність

зіткнення (точка 1) буде в 2039 р. (MJD 66000). Вона спричиниться поверненням в екваторіальну площину орбіти найнебезпечнішого супутника 78113D.

На основі даних, приведених на рис. 2, було зроблено висновок, що найнебезпечнішими для активних ГС є інтервали довгот: 40—60°, 100—120°, 160—180°, 220—240°, 280—300°, 340—360°. Для перевірки цього положення побудували розподіл небезпечних зближень п'яти НГО з активними ГС по географічних довготах за даними архіву небезпечних зближень в інтервалі 1995—2042 рр. (рис. 5). Крива будувалась за значеннями частот  $P$ , приведених до одиничного інтервалу. Інтервали розбиття  $\Delta\lambda = 7.5^\circ$ . Пунк-

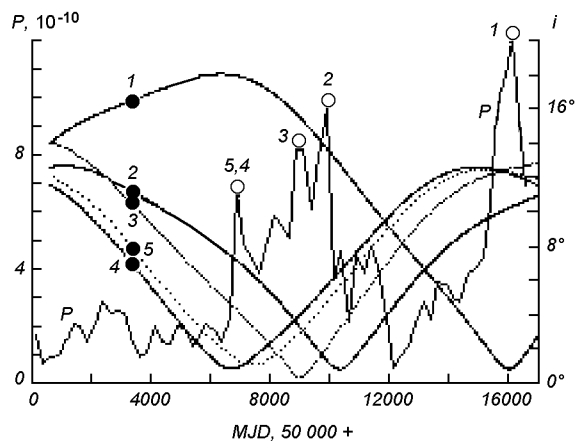


Рис. 4. Зміна ймовірності  $P$  зіткнення за добу п'яти НГО (78113D, 67066G, 70055A, 66053J, 68050J) з активними ГС протягом 47 років (1995—2042 рр., а також прогнозовані зміни нахилу  $i$  їхньої орбіти

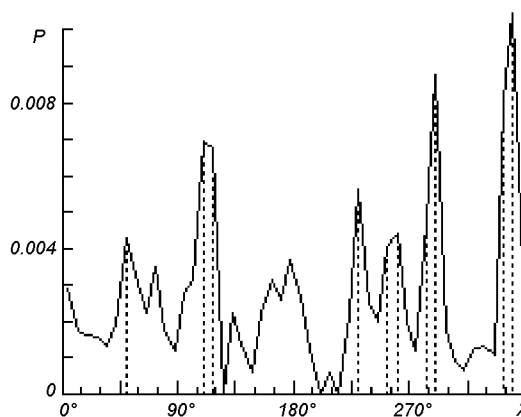


Рис. 5. Розподіл небезпечних зближень п'яти НГО з активними ГС по географічних довготах за даними архіву небезпечних зближень в інтервалі 47 років (1995—2042 рр.)

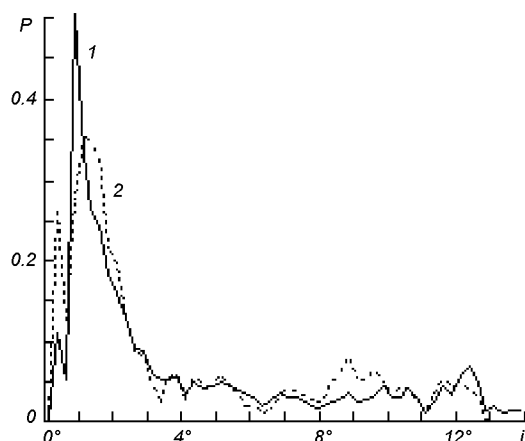


Рис. 6. Розподіл небезпечних зближень з активними ГО за нахилом орбіти: 1 — п'ять НГО за даними архіву в проміжку 47 років, 2 — чотири НГО за даними архіву в проміжку 28 років

тирними прямими показані географічні довготи центрів інтервалів  $\Delta\lambda$ , частоти небезпечних зближень в яких перевищують 0.04. Приблизні значення цих довгот:  $50^\circ$ ,  $110^\circ$ ,  $115^\circ$ ,  $230^\circ$ ,  $280^\circ$ ,  $290^\circ$ ,  $340^\circ$ ,  $350^\circ$ . Всі вони попадають в приведені вище небезпечні інтервали.

На рис. 6 наведені криві розподілу по нахилу  $i$  орбіти НГО ймовірності небезпечних зближень НГО 78113D, 70055A, 68050J, 67066G, 66053J з активними ГО за даними архіву небезпечних зближень для 1995—2042 рр. (крива 1) і небезпечних зближень НГО 70055A, 68050J, 67066G, 66053J — для 1995—2023 рр. (крива 2). По вертикальній осі — частота зближень, приведена до одиничного інтервалу нахилу орбіти. Величина інтервалів розбиття  $\Delta i = 0.3^\circ$ . В обох випадках спостерігається різке збільшення (у 5—10 разів) небезпечних зближень НГО до активних ГО при нахилах орбіти НГО  $i < 2^\circ$ . Особливо це помітно на інтервалі 1995—2042 рр., коли враховувалися зближення найнебезпечнішого супутника 78113D.

## ВИСНОВКИ

В часовому інтервалі 1995—2013 рр. немає НГО, нахил орбіти яких близький до  $0^\circ$ . Ймовірність зіткнення за добу на цьому інтервалі змінюється в межах від  $0.01 \cdot 10^{-8}$  до  $0.03 \cdot 10^{-8}$ .

На проміжку 2014—2042 рр. орбіти п'яти НГО повернуться у площину екватора. До 2026 р. ймовірність зіткнення за добу в екстремальних випадках буде коливатися в межах  $0.07 \cdot 10^{-8}$ — $0.10 \cdot 10^{-8}$ . В 2039 р. у площину екватора повернеться орбіта найнебезпечнішого НГО, і ймовірність зіткнення досягне найбільшого значення  $0.12 \cdot 10^{-8}$ .

Повернення орбіт НГО перших запусків у площину екватора може збільшити ймовірність зіткнення в 3—6 разів. Але це не спричинить значної небезпеки для активних супутників, бо ризик зіткнення залишиться дуже малим. Ймовірність зіткнення за рік НГО з активними ГС не буде перевищувати величини  $P = 4.4 \cdot 10^{-7}$ .

В розрахунках не враховані НГО, нахили орбіт яких до 2042 р. не досягнуть нульового значення та деякі інші. Але це суттєво не вплине на отримані результати, бо ймовірність їхнього зіткнення з активними ГС значно менша, ніж ймовірність зіткнення розглянутих п'яти НГО.

1. Багров А. В., Ерпылев Н. П., Микиша А. М. и др. Экспериментальная геодинамика: наблюдения геостационарных ИСЗ // Науч. информ. Астрон. совет АН СССР.—1991.—Вып. 69.—С. 35—51.
2. Єпішев В. П., Мотрунич І. І., Клімик В. У. Ризик зіткнення штучних космічних об'єктів на геосинхронних орбітах // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 5/6.—С. 159—163.
3. Сочилина А. С., Киладзе Р. И., Григорьев К. В., Вершков А. Н. Каталог орбит геостационарных спутников. — С.-Петербург: ИТА РАН, 1996.—104 с.
4. Hernandez C., Jehn R. Classification of geosynchronous objects. Issue 8. — Darmstadt: ESA ESOC, 2006.—119 p.
5. Klimik V., Kizyun L. Hazard of collisions in geostationary ring // Кинематика и физика небес. тел. Приложение.—2005.—№ 5.—С. 393—397.

## RETURNING OF ORBITS OF GEOSYNCHRONOUS OBJECTS IN THE EQUATOR PLANE AND HAZARD OF COLLISION ON GEOSTATIONARY ORBIT

V. P. Epishev, I. I. Motrunych, V. U. Klimyk

The influence of returning of unguided geosynchronous object orbits in the equator plane on hazard of collision on geostationary orbit is studied. For small inclinations of the orbits of the most dangerous unguided objects, the probability of collision can increase by three to six times, but it remains very small. The distribution with the of dangerous segments of a geostationary orbit longitude is given and its periodicity for large time intervals is established. The hazard of collision can change its value twice with the longitude.