

ПОВЕРНЕННЯ ОРБІТ ГЕОСИНХРОННИХ ОБ'ЄКТІВ В ПЛОЩИНУ ЕКВАТОРА І РИЗИК ЗІТКНЕННЯ НА ГЕОСТАЦІОНАРНІЙ ОРБІТІ

В.П. Єпішев, І.І. Мотрунич, В.У. Клімик, К.А. Кудаєв, Г.М. Маєв

Ужгородський національний університет, Лабораторія космічних досліджень

88000, Ужгород, вул. Далека, 2а

e-mail: space@univ.uzhgorod.ua

Протягом 2013 – 2042 років в площину екватора повернуться орбіти 5 геосинхронних супутників перших запусків, що мають порівняно великий ризик зіткнення з активними супутниками. В результаті цього ймовірність зіткнення некерованих об'єктів з активними супутниками може збільшитись в 3 – 6 разів. Проте це не буде становити серйозної небезпеки для активних супутників.

Вступ

Після припинення коректування активних геостаціонарних супутників (ГС) вони починають рухатися як некеровані геосинхронні об'єкти (НГО); змінюється не тільки географічна довгота підсупутникової точки об'єкта, але також нахил орбіти в межах від 0° до $\sim 15^\circ$. Повернення орбіти більшості НГО в площину екватора відбувається з періодом $53,5 \pm 0,5$ роки [1]. Перші ГС були запуснені в 1966 – 1969 роках. Через декілька років їх орбіти почнуть повертатися в площину екватора, що може становити загрозу зіткнення з активними ГС, які рухаються в цій площині. Актуальною стає задача дослідження впливу повернення орбіт НГО в площину екватора на ризик їх зіткнення з активними ГС.

Ймовірність перетину геостаціонарної орбіти некерованими НГО

Під зоною руху геостаціонарних супутників будемо розуміти область, всі точки якої знаходяться на відстані r від геостаціонарної орбіти, що не перевищує 100 км. Прослідкуємо рух НГО з каталога на 1996 рік [2], які можуть заходити в зону ГС. За розрахунками на період з 1990 по 1995 рік таких НГО є 66. Сюди входять всі 16 супутників перших запусків (з 1966 по 1969 рік). Всього каталог [2] містить 364 НГО.

Визначення орбіт цих 66 НГО проводили на основі аналітичної теорії руху ГО, що враховує головні збурюючі ефекти гравітаційного походження: несферичність Землі, сили тяжіння Сонця і Місяця [3]. Положення НГО визначали з кроком 0,01 доби. В процесі роботи програми заносились в спеціальний файл (архів) параметри небезпечних наближень НГО до геостаціонарної орбіти, на відстань до 100 км [4, 5].

Всього за 34 роки, з 1994 по 2028 рік (MJD 49500 – 62000), за підрахунками відбудеться 6098 небезпечних наближень НГО до геостаціонарної орбіти. За цими даними побудована емпірична функція густини розподілу відстані НГО до геостаціонарної орбіти при входженні супутника в зону геостаціонарних супутників.

Функція побудована за точками

$$P = \frac{m}{n \cdot \Delta r}, \text{ де } \frac{m}{n} - \text{частота наближення}$$

НГО на відстань, що знаходиться в інтервалі Δr . Інтервали розбиття $\Delta r = 5$ км. Методом найменших квадратів побудована усереднена густина розподілу – поліном другого порядку:

$$P(r) = a_0 + a_1 \cdot r + a_2 \cdot r^2, \\ \text{де } a_0 = 5,6201 \cdot 10^{-3}; a_1 = 1,1154 \cdot 10^{-4}; a_2 = -3,5928 \cdot 10^{-7}.$$

Середній діаметр геосинхронного супутника за каталогом [2] 8,15 м. Будемо вважати, що НГО проходить через геостаціонарну орбіту (перетинає її), якщо міні-

мальна відстань від центра НГО до геостационарної орбіти не перевищує 8 метрів. Ймовірність P_z проходження НГО через геостационарну орбіту при входженні в зону геостационарних супутників визначається як інтеграл з функції густини в межах від 0 до 8м. Для даного часового інтервалу

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

При побудові кривої зміни ймовірності перетину НГО геостационарної орбіти за 1 добу (рис.1, крива 1) ймовірність визначалася як середнє значення в інтервалі $dt = 250$ діб. Крива побудована для часового проміжку з 1995 по 2028 рік (MJD 50000-62000). По горизонтальній вісі – кількість діб від початку відліку, 10 жовтня 1995 року. На графіку видно, що ймовірність P перетину орбіти за добу коливається в межах від 0,000015 до 0,000035. Немає тенденції до зростання ймовірності зіткнення, хоча з 2013 по 2028 рік орбіти декількох супутників пройшли через площину екватора.

Для порівняння на рис.1, крива 2, показана зміна ймовірності перетину геостационарної орбіти протягом доби в інтервалі з 1990 по 1995 рік (MJD 48000-50000). Числа на горизонтальній осі треба ділити на 6. Початок відліку – 19 квітня 1990 року. Ймовірність тут – це середнє значення в інтервалі $dt = 50$ діб. Вона змінюється в тих самих межах: від 0,000015 до 0,000035.

З вигляду знайденої кривої розподілу небезпечних наближень НГО до геостационарної орбіти за нахилом орбіти за даними архіву на період з 1994 по 2028 рік (рис.2, крива 1) впливає, що найнебезпечнішими є супутники з нахилом орбіти від 10° до 18° . Це пояснюється тим, що є декілька супутників, які мають великі нахили орбіт і досить часто проходять через геостационарну орбіту із-за дуже великих дрейфів. Такими є НГО 77034С (його середній дрейф $\dot{\delta} = -17,0^\circ/d$, ексцентриситет $e = 0,030$) і 78113D ($\dot{\delta} = -22,9^\circ/d$, $e = 0,028$). Ці, а також деякі інші небезпе-

небезпечні НГО в 1990 – 1995 рр. мали нахил $10^\circ - 13^\circ$ і створювали сильний максимум кривої густини розподілу за даними архіву на цей період (рис.2, крива 2). На вертикальній вісі графіка на рис.2 – частота, приведена до одиничного інтервалу нахилу, тобто криві є емпіричними густинами розподілу. Інтервали розбиття $\Delta i = 0,5^\circ$. Згадуваний супутник 78113D є найнебезпечнішим для активних геостационарних супутників [5]. Майже 20% всіх небезпечних наближень на проміжку з 1994 по 2028 р. – це наближення цього супутника до геостациональної орбіти на відстань менше 100 км.

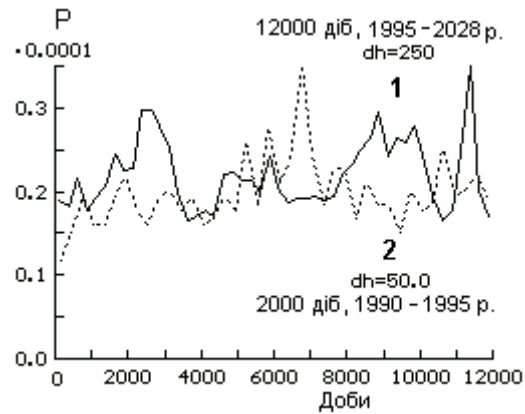


Рис. 1. Зміна ймовірності перетину геостационарної орбіти некерованим ГО за 1 добу: (1) в інтервалі 33 роки (1995 – 2028 рр.) і (2) в інтервалі 5,5 років (1990 – 1995 рр.).

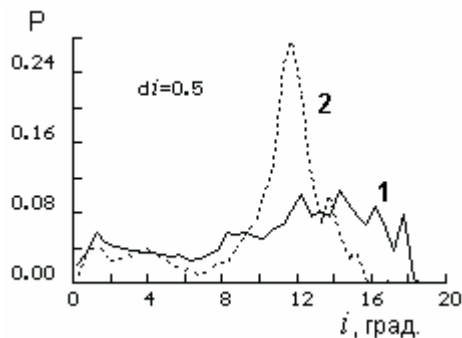


Рис. 2. Розподіл небезпечних наближень НГО до геостационарної орбіти за нахилом орбіти за даними архіву: (1) в інтервалі 34 роки (1994 – 2028 рр.) і (2) в інтервалі 5,5 років (1990 – 1995 рр.).

На графіку 1, рис.2 видно, що НГО з нахилами, близькими до нуля, на проміжку 1994 – 2028 рр. не становлять великої

великої небезпеки; вони створюють лише невеликий максимум кривої густини розподілу в точці $i \approx 1^\circ$. Значення P при нахилах $i < 1^\circ$ на графіку занижені із-за невизначеності деяких елементів орбіт при $i = 0^\circ$.

Більшість активних супутників мають ексцентриситет в межах від 0,0001 до 0,0005. Ексцентриситет небезпечних НГО значно більший. Некеровані супутники з ексцентриситетом $e < 0,005$ взагалі не наближаються до геостационарної орбіти ближче 20 км. Це видно на рис.3, де точки визначають ексцентриситет і мінімальну відстань до геостационарної орбіти при проходженні НГО через зону геостационарних супутників в проміжку з 1994 по 2028 рік. Крива на рис.3 є розподілом частот P (приведених до одиничного інтервалу e) небезпечних наближень НГО до геостационарної орбіти за ексцентриситетом e . Вертикальна вісь для кривої – справа. Крива має два великих максимуми: в точках $e = 0,007$ та $e = 0,028$. Менші максимуми – при $e = 0,014$ та $e = 0,016$. Максимум в $e = 0,004$ зумовлений небезпечними наближеннями на відстань від 30 до 100 км – точки лише в верхній частині рисунка.

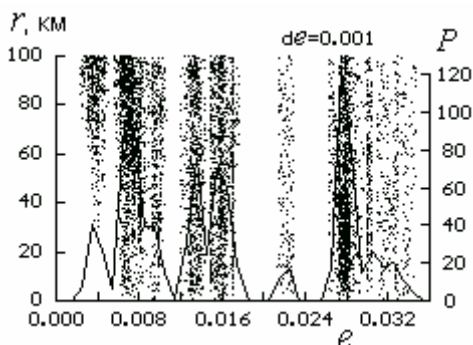


Рис. 3. Розподіл наближень НГО за ексцентриситетом e і відстанню до геостационарної орбіти r при небезпечних наближеннях до неї за даними архіву в інтервалі 34 роки, 1994 – 2028 рр.

Для визначення найбезпечніших зон геостационарної орбіти знайшли розподіл географічних довгот НГО в момент мінімальних небезпечних наближень до геостационарної орбіти за даними архіву небезпечних наближень в інтервалі 34 роки,

1994 – 2028 рр. (рис.4, крива 1). Область розбиття по довготі – $7,5^\circ$. Крива з точністю до деякої похибки періодична з періодом 60° , має гострі максимуми; їх довготи показані на рисунку пунктирними вертикальними лініями. Перший максимум знаходиться в точці $\lambda \approx 50^\circ$. Періодичність довготи небезпечних наближень не спостерігалася в часовому інтервалі 1990 – 1995 рр. (рис.4, штрихова крива).

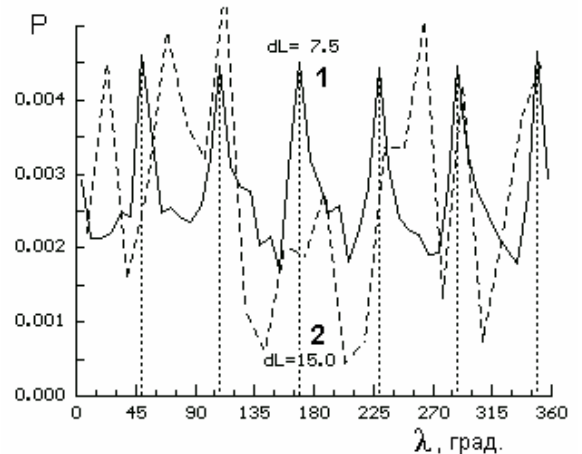


Рис. 4. Розподіл небезпечних наближень НГО до геостационарної орбіти за географічною довготою за даними архіву:

- (1) в інтервалі 34 роки, 1994 – 2028 рр., і
- (2) в інтервалі 5,5 років, 1990 – 1995 рр.

Отже, на далеку перспективу (до 1028 року), найбільш небезпечними для активних ГС є довготи $\lambda \approx 50^\circ + 60^\circ \cdot n$ ($n = 0, 1, 2, 3, 4, 5$) і їх околицями радіусом біля 10° . За межами цих довгот ризик зіткнення на геостационарній орбіті менший майже в 2 рази.

Через 10 – 20 років не слід чекати різкого збільшення входжень НГО в зону активних ГО, зумовленого поверненням орбіти перших ГО в площину екватора. Але при малих кутах нахилу НГО при кожному входженні кількість зіткнень з активними супутниками може зрости із-за довшого часу перебування в цій зоні.

Прогноз зміни ризику зіткнення НГО з активними ГС в інтервалі 5,5 років через 27 років

Для дослідження ризику зіткнення супутників створили архів небезпечних

зближень (до відстані 100 км) НГО з активними ГС в часовому інтервалі MJD 58000 – 60000 (2017 – 2023 pp.).

Положення активних ГС визначали за каталогом [2].

Наближено функцію густини розподілу відстані r між НГО і активним ГС при їх 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 активного ГО з НГО при небезпечному зближенні визначається як інтеграл цієї функції, межі інтегрування – 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.

кож на часовому проміжку 2000 діб, але на час MJD 48000-50000 (1990 – 1995 pp.)

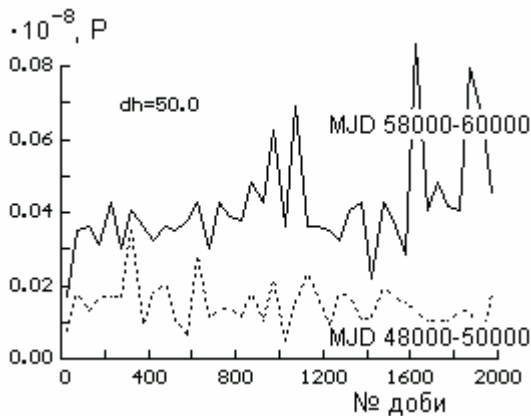


Рис.5. Зміна ймовірності зіткнення НГО з активними ГО за добу за даними каталога 1996р. в інтервалі 2000 діб: а) MJD 48 000 – 50 000 (1990 – 1995 pp.); в) MJD 58 000 – 60 000 (2017 – 2023 pp.).

На рис.5 приведено криві зміни ймовірності зіткнення протягом доби НГО з активними супутниками на часовому проміжку 2000 діб. Суцільна крива – зміна ймовірності в інтервалі MJD 58000-60000 (2017 – 2023 pp.). Для порівняння знайшли зміну ймовірності зіткнення за добу НГО з активними супутниками та-

– пунктирна крива на рис.5. Ймовірність обчислювалась як середнє значення на інтервалі 50 діб.

Протягом 1990-1995 рр. ймовірність змінювалась в межах від $0,005 \cdot 10^{-8}$ до $0,035 \cdot 10^{-8}$, протягом 2017-2023 рр. – в межах 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 в площину екватора; вони мають відбутися в основному в 2014 – 2023 рр.

Значне збільшення ризику зіткнення за 27 років не становить загрози для активних ГО із-за дуже малої ймовірності зіткнення. На проміжку 2017 – 2023 рр. ймовірність зіткнення НГО з активними ГО за рік дуже мала, вона не перевищує $\sim 3,7 \cdot 10^{-7}$.

Із-за малих нахилів орбіт чотирьох небезпечних НГО перших запусків 70055A, 68050J, 66053J, 67066G ці супутники в період MJD 58000-60000 будуть значно небезпечніші за ГО **78113D**.

На ці 5 НГО припадає 69% всіх небезпечних зближень за 5,5 років (2017 – 2023 рр.). За цей же проміжок часу в 1990 – 1995 рр. на них припадало 36% небезпечних зближень; НГО **78113D**, 70055A, 68050J, 66053J, 67066G наближались на небезпечну відстань до активних ГО відповідно 121, 19, 16, 2, 45 разів.

Залежність ризику зіткнення НГО з активними ГО від нахилу орбіти НГО в інтервалі 47 років

Розглянемо рух лише цих 5 НГО. Підрахунки відповідного інтегралу показують, що за даними архіву небезпечних зближень на проміжку MJD 50000 – 67000 (1995 – 2042 рр.) ймовірність зіткнення НГО **78113D**, 70055A, 68050J, 66053J, 67066G з активними ГО при небезпечному зближенні $P'_z = 1,6 \cdot 10^{-9}$. Зміна ймовірності зіткнення за добу 5 НГО з активними ГО на цьому проміжку показана на рис.6. Ймовірність обчислювалась як середнє в інтервалі 250 діб.

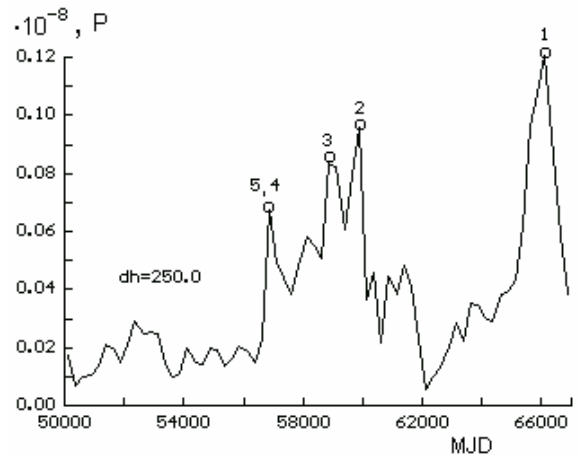


Рис. 6. Зміна ймовірності зіткнення за добу 5 некерованих ГО з активними ГО протягом 47 років (1995 – 2042 рр.).

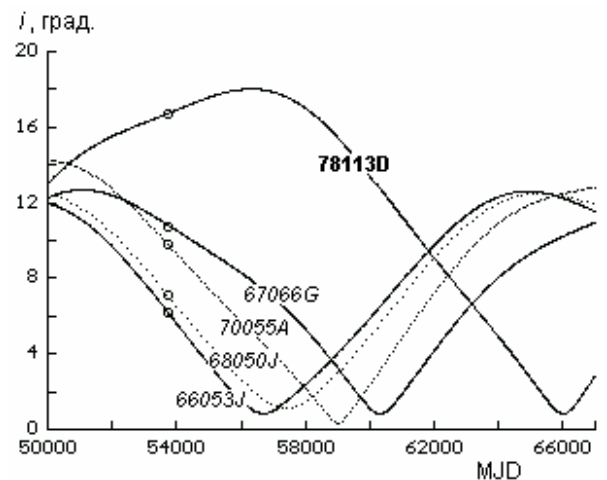


Рис. 7. Прогноз зміни нахилу орбіти в часовому проміжку MJD 50000 – 67000 (1995 – 2042 рр.) супутників: **78113D**, 67066G, 70055A, 66053J, 68050J. Точки – значення нахилу за каталогом ESA на кінець 2005 року.

Перший великий максимум зміни ймовірності (позначений на рис.6 цифрою 5, 4) попадає на час \sim MJD 56900 (2014 рік). Він приблизно співпадає з часом повернення площин орбіт супутників 68050J, 66053J в екваторіальну площину. Це видно на рис.7, де показано прогноз зміни нахилів орбіт 5 НГО протягом 47 років (MJD 50000 – 67000), обчислений за каталогом на 1996 рік [2]. Для оцінки точності прогнозу приведені точні значення нахилів для 5 супутників на кінець грудня 2005 року за каталогом Європейського космічного агентства [6] – п'ять точок на кривих (рис.7) на час MJD 53733 – 53734.

Слідуючі два великі максимуми зміни ймовірності зіткнення (точки 3 і 2 на

рис.6) мають бути в 2020 і 2023 роках (~MJD 59000, 60000) під час повернення орбіт НГО 70055A, 67066G в екваторіальну площину. Найбільша ймовірність зіткнення (точка 1 на рис.6) буде в ~2039 році (MJD 66000). Вона спричиниться проходженням через екваторіальну площину орбіти найнебезпечнішого супутника **78113D**.

З рис. 4 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 5 НГО з активними ГС по географічних довготах за даними архіву небезпечних зближень в інтервалі 1995 – 2042 рр. (рис.8).

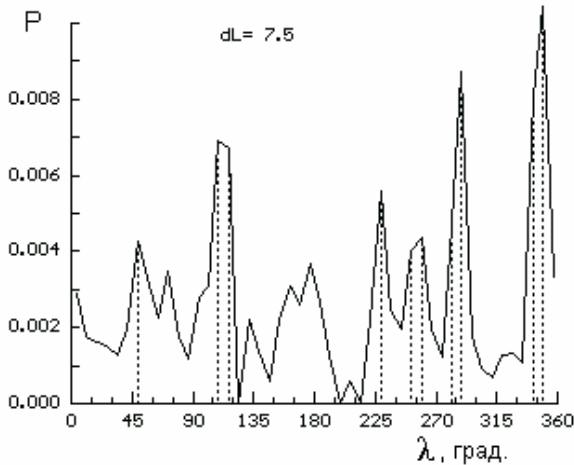


Рис. 8. Розподіл небезпечних зближень 5 НГО з активними ГС по географічних довготах за даними архіву небезпечних зближень в інтервалі 1995 – 2042 рр.

Крива будувалась за значеннями частот P , приведених до одиничного інтервалу. Інтервали розбиття $\Delta\lambda = 7,5^\circ$. Пунктирними прямими на рисунку показані довготи центрів інтервалів $\Delta\lambda$, частоти небезпечних зближень в яких перевищують 0,004. Приблизні значення цих довгот: 50°, 110°, 115°, 230°, 280°, 290°, 340°, 350°. Всі вони попадають в приведені вище небезпечні інтервали.

На рис.9 наведені криві розподілу за нахилом орбіти i НГО небезпечних зближень 5 НГО **78113D**, 70055A, 68050J,

67066G, 66053J з активними ГО за даними архіву небезпечних зближень в часовому проміжку MJD 50000 – 67000 (крива 1) і небезпечних зближень 4 НГО 70055A, 68050J, 67066G, 66053J з активними ГО – в проміжку MJD 50000 – 60000 (крива 2). По вертикальній вісі – частота зближень, приведена до одиничного інтервалу нахилу орбіти. Величина інтервалів розбиття $\Delta i = 0,3^\circ$. В обох випадках спостерігається різке зростання небезпечних зближень НГО до активних ГО, в 5 – 10 разів, при нахилах орбіти НГО i менших 2° . Особливо це помітно в проміжку MJD 50000 – 67000, коли враховуються зближення найнебезпечнішого супутника **78113D**.

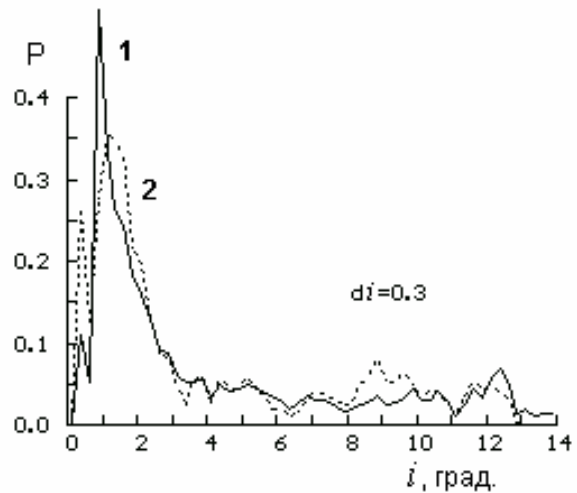


Рис.9. Розподіл небезпечних зближень з активними ГО за нахилом орбіти: (1) 5 НГО **78113D**, 70055A, 68050J, 67066G, 66053J за даними архіву в проміжку MJD 50000–67000 (1995-2042 рр.) і (2) 4 НГО 70055A, 68050J, 67066G, 66053J за даними архіву в проміжку MJD 50000–60000 (1995-2023 рр.).

Висновки

Весь часовий проміжок MJD 50000 – 67000 (горизонтальна вісь на рис.6) можна розбити на два інтервали:

1) MJD 50000 – 56500 (1995 – 2013 рр.). Тут немає некерованих супутників, нахил орбіти яких близький 0° . Ймовірність зіткнення за добу на цьому інтервалі змінюється в межах від $0,01 \cdot 10^{-8}$ до $0,03 \cdot 10^{-8}$. Середнє значення ймовірності: $0,02 \cdot 10^{-8}$.

2) MJD 56700 – 67000. В цьому інтервалі орбіти 5 НГО проходять через площину екватора. До часу MJD 61000 ймовірність зіткнення за добу в екстремальних випадках досягає значень $0,07 \cdot 10^{-8}$ – $0,10 \cdot 10^{-8}$. В 2039 році (MJD 66000) ймовірність зіткнення досягає найбільшого значення: $0,12 \cdot 10^{-8}$. З останнього результату випливає, що ймовірність зіткнення за рік НГО з

за рік НГО з активними ГС не може перевищувати величини $P_{\max} = 4,4 \cdot 10^{-7}$.

Порівнюючи ці дані, можна зробити висновок, що проходження орбіт НГО перших запусків через площину екватора може збільшити ймовірність зіткнення в 3 – 6 разів.

Цей результат може бути трохи завищений, так як не враховані інші НГО, орбіти яких до 1942 року не перетнуть площину екватора.

Не враховані також деякі НГО, нахили орбіт яких за прогнозом досягнуть нульового значення до 1942 року. Але вони суттєво не вплинуть на отримані результати, так як ймовірність зіткнення їх з активними ГС значно менша, ніж ймовірність зіткнення розглянутих 5 НГО.

Література

1. Клімик В.У., Кудак К.А., Мацо А.М. // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія фізика. – Вип.12, – Ужгород, 2002. – С.35–42.
2. Сочилина А.С., Киладзе Р.И. и др. Каталог орбит геостационарных спутников. – С.-Петербург: ИТА РАН, 1996. – 104 с.
3. Багров А.В., Ерпылев Н.П., Микиша А.М., Рыхлова Л.В., Смирнов М.А., Сочилина А.С. // Научные информа-
- ции. – Вып.69, – Москва, ИА АН СССР, 1991. – С.35–51.
4. Єпішев В.П., Мотрунич І.І., Клімик В.У. // Космічна наука і технологія. – Т.10, №5/6, – К.: НКАУ, НАНУ, – 2004. – С.159-163.
5. Klimik V., Kizyun L. // Кинематика и физика небесных тел. Приложение. – №5, – Киев: НАНУ, 2005. – С.393-397.
6. Hernandez C., Jehn R.. Classification of geosynchronous objects. – Issue 8. – Darmstadt: ESA ESOC, 2006. – 119 p.

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

**V.P. Yepishev, I.I. Motrunich, V.U. Klimyk,
K.A. Kudak, G.M. Matso**

Uzhgorod National University, Laboratory of space researches

Daleka str. 2a, 88000, Uzhgorod, Ukraine

e-mail: space@univ.uzhgorod.ua

In a plane of equator will return during 2013 - 2042 orbit of five geosynchronous satellites of the first start having rather large hazard of collision with controlled satellites. As a result of it the probability of collision of unguided objects with fissile

satellites can increase in 3 - 6 times, that will not make large danger to fissile satellites.