

ЗАСЕЛЕНІСТЬ ГЕОСТАЦІОНАРНОЇ ОРБИТИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЇЇ КОНТРОЛЮ

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

Ужгородський національний університет, Лабораторія космічних досліджень
вул. Далека, 2а, 88000, Ужгород

Визначено зміну ризику зіткнення на геостационарній орбіті протягом останніх 8 років. В середньому він змінювався мало за винятком двох сильних стрибків. Виявлено, що повернення орбіти дрейфуючого об'єкта в площину екватора може спостерігатися не тільки через 53 роки після його виведення з робочого режиму, але і через 2 – 4 роки після невдалого запуску ГСС на орбіту. Зокрема, в кінці грудня 2009 року нахил орбіти Таїландського супутника 97016А перейшов через нульове значення. В результаті цього ризик зіткнення некерованих супутників з активними зріс в 3 – 4 рази. Його максимум не співпадає з моментом повернення об'єкта в площину екватора. Більше того, таких максимумів може бути два.

Ключові слова: геосинхронні супутники, геостационарна орбіта, ризик зіткнення, повернення орбіти в площину екватора.

Вступ

В 1997 році Міжвідомчий координаційний комітет по космічному сміттю (IADC, Inter-Agency Space Debris Coordination Committee) прийняв рекомендації, згідно з якими зона на 200 км вище ідеальної геостационарної орбіти (GEO) і на 200 км нижче GEO вважається захищеною. Всі

геостационарні супутники, ресурс яких закінчувався, рекомендується виводити на геосинхронні орбіти, перигей яких не менше, ніж на 300 км вище GEO, так як некеровані геосинхронні об'єкти (НГО), які знаходяться в смузі між 200 і 300 км вище GEO в результаті еволюції орбіти можуть заходити в 200-кілометрову захищену зону.

Таблиця 1

Найнебезпечніші геосинхронні об'єкти, які з'явилися в 2007 – 2009 роках

№ п/п	Номер CASPAR і назва об'єкта	Країна і дата переходу на некеровану орбіту	Відстань перигея і апогея від GEO
1	92043A Gorizont 26	Росія, 2007	160, 420
2	00002A Galaxy 10R	США, 2008	170, 190
3	08022B Zenith-3SLB (3-тя ст.р.)	Росія, 2008	-800, +3600
4	93069A Gorizont 28	Росія, 2009	40, 310
5	96063B Measat 2	Малайзія, 2009	85, 112
6	99009A Arabsat 3A	Сауд. Аравія, 2009	-6, +63
7	00020A Galaxy IVR	США, 2009	111, 136
8	00014A Ekran 21	Росія, 2009	65, 322
9	07003A Beidou 4	Китай, 2009	51, 585

Починаючи з 1998 року оператори космічних апаратів прагнули виконувати рекомендації IADC про захищену зону GEO. Через 10 років здавалося, що рекомендації IADC стають стандартною процедурою з все меншою кількістю виключень. В 2007 році лише один відпрацьований супутник (92043A) почав рухатися на орбіті, що входила в захищену зону: перигей і апогей знаходилися відпо-

відно на 160 км і на 420 км вище GEO [1]. Також один об'єкт (93062A) залишився на лібраційній орбіті. Але надії виявилися марними. В наступні два роки на орбіти з перигеєм на 300 км вище GEO виводилось значно менше половини об'єктів: 38% (в 2008 році) і 46% (в 2009 році). Кількість об'єктів, що виходили на орбіту в 200-кілометрову захищену зону різко зростає: з 2 до 9 (в 2008 році) і 12 об'єктів (в 2009 ро-

ці). Серед них є два найнебезпечніших дрейфуючих об'єкти: 08022B Zenith-3SLB і 99009A Arabsat 3A (таблиця 1). При нульових значеннях нахилу орбіти вони двічі на добу перетинають геостационарну орбіту.

Такий стан з виконанням рекомендацій IADC приводить до різких стрибків ризику зіткнення на геостационарній орбіті.

Ризик зіткнення на геостационарній орбіті протягом 2007 – 2010 років

Для дослідження ризику зіткнення нами використано три випуски каталогу ESA, що вийшли на початку 2008, 2009, 2010 років [1, 2, 3] і дають елементи орбіт ГО на кінець попереднього року. За даними елементів орбіт цих каталогів побудували графік зміни ймовірності зіткнення за добу на GEO протягом трьох років: з липня 2007 року по червень 2010 року (рис. 1). Ця крива складається з трьох окремих кривих. Кожна з них побудована на часовому інтервалі, рівному 1 року. Центр кожного інтервалу, кінець грудня, співпадає з епохою відповідного каталогу ESA, за орбітами якого будувалась річна крива. Центри трьох інтервалів по вісі часу на рис. 1 показані трьома довгими рисками.

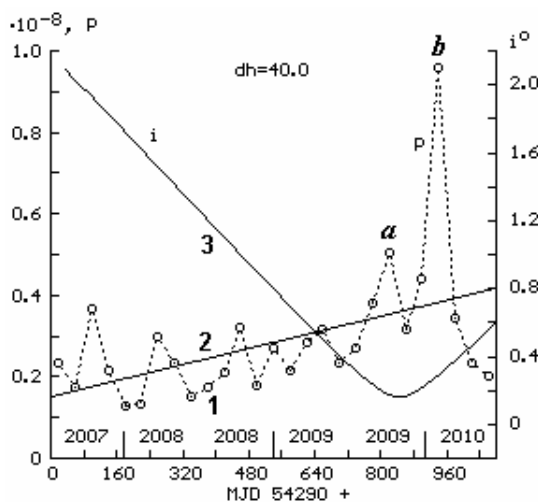


Рис. 1. Зміна ймовірності зіткнення на геостационарній орбіті протягом доби на інтервалі трьох років (1), лінія регресії (2) і зміна нахилу орбіти супутника 06053С на цьому ж інтервалі (3).

Крива 1 на рис. 1 будувалася за точками – середніми на проміжку 40 діб зна-

ченнями ймовірності зіткнення протягом доби. Ймовірність зіткнення визначалася як добуток ймовірності небезпечного наближення НГО до керованого ГС (на відстань до 100 км) на ймовірність зіткнення P_3 при небезпечному наближенні. Ймовірність зіткнення P_3 обчислювалася як інтеграл з функції густини:

$$P_3 = \int_0^{r_0} p(r) dr, \quad (1)$$

де r_0 – відстань між центрами супутників, що зближуються. Приймали, що супутники зіткнулися, якщо відстань $r_0 = 8$ метрів. Ця відстань близька до середнього діаметра каталожних геосинхронних об'єктів.

Густина розподілу $p(r)$ в (1) визначалася за принципом найменших квадратів як поліном 3-го порядку без вільного члена

$$p(r) = a_1 \cdot r + a_2 \cdot r^2 + a_3 \cdot r^3$$

(рис. 2) за значеннями частоти p_i небезпечних зближень, приведеної до одиничного відрізка відстані Δr між супутниками:

$$p_i = \frac{m}{n \cdot \Delta r}.$$

При обчисленні інтегралу (1) достатньо обмежитися членом 1-го степеня. Отримаємо $P_3 = a_1 \cdot r_0^2 / 2$. Розрахунки показують, що ця ймовірність коливається навколо значення $P_3 = 3.0 \cdot 10^{-9}$. За цією величиною проводилися обчислення ризику зіткнення об'єктів на геостационарній орбіті в [4, 5, 6, 7, 8].

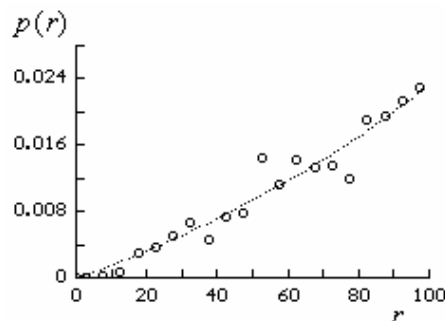


Рис. 2. Густина розподілу мінімальної відстані між двома супутниками при небезпечних зближеннях НГО з активними ГС за даними каталогів ESA на 2007, 2008, 2009 роки.

За знайденими ймовірностями зіткнення за добу на GEO в інтервалі 3 років

побудували пряму регресії (крива 2 на рис. 1) зміни ймовірності:

$$P(t) = (0.000246 \cdot t + 0.153) \cdot 10^{-8}, \quad (2)$$

коефіцієнт кореляції $\rho = 0.45$.

Час t в (2) вимірюється в добах з початком відліку 1 липня 2007 року. З (2) слідує, що в останні 3 роки ймовірність зіткнення на GEO щорічно збільшувалася в 0.09 рази. Протягом попереднього 5-річного інтервалу (2002 – 2007 роки) ця ймовірність збільшувалася значно повільніше – в 0.03 щорічно [7, 8]. Проте середня ймовірність в цих двох часових інтервалах практично не змінилася і складає $0.3 \cdot 10^{-8}$. Це, зокрема, пояснюється тим, що ймовірність зіткнення на GEO змінюється нерівномірно, вона більша в ті роки, коли стається багато невдалих спроб відправити відпрацьовані супутники за межі захищеної зони.

На рис. 3 наведено ймовірності зіткнення за добу на геостационарній орбіті протягом 2003 – 2010 років, де було використано значення ймовірності з рис. 1 і ймовірності в 2003 – 2007 роки з [7]. Середня ймовірність зіткнення за добу за ці 8.5 років змінилася мало. Лінія регресії $P = [a \cdot (\text{MJD} - 52600) + b] \cdot 10^{-8}$ має кутовий коефіцієнт $a = 0.000032$, звідки отримуємо, що за 8 років ймовірність збільшилася на $0.09 \cdot 10^{-8}$. Середня за 8.5 років ймовірність складає $P_{\text{cp}} = (0.29 \pm 0.15) \cdot 10^{-8}$.

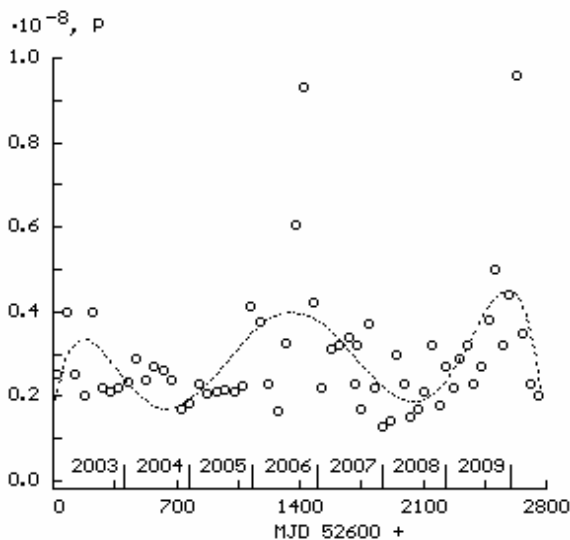


Рис. 3. Зміна ймовірності зіткнення за добу на геостационарній орбіті протягом 2003 – 2010 років.

Пунктирна крива на рис. 3 – це полі-

ном 6-го степеня, побудований за принципом найменших квадратів. Такий поліном може мати до 5 екстремумів (max, min). Два більші максимуми припадають на 2006 рік, коли з'явився дуже небезпечний дрейфуючий супутник 97016A, і на 2009 – 2010 роки після ряду невдалих відправлень відпрацьованих ГС за межі захищеної зони GEO. Зокрема, 10% всіх небезпечних наближень на період VII.2009 – VI.2010 припадає на НГО 08022В (таблиця 1), в якого перигей і апогей знаходяться по різні боки GEO. У нього великий дрейф ($\dot{\lambda} = -17^\circ/\text{доб.}$) і на початку переходу на дрейфуючу орбіту близький до нуля нахил орбіти.

Але найнебезпечнішим в 2009 – 2010 роках виявився об'єкт 06053С FengYun 2D АКМ, що наближався на небезпечну відстань (до 100 км) до активних ГС 129 разів, що складає 26% всіх небезпечних наближень до діючих ГС за три роки. Цей ракетний двигун від китайського активного супутника 06053А FengYun 2D, запущеного на довготу 86.5° , з'явився на дрейфуючій орбіті в 2006 році [9]. Він зміщується з дрейфом $\dot{\lambda} = -3.3^\circ/\text{доб.}$ Перигей і апогей знаходився відповідно на 184 км нижче і на 700 км вище GEO. Небезпека полягала в тому, що малий нахил орбіти зменшувався (рис. 1, крива 3) і в кінці жовтня 2009 року відбувся його перехід через нульове значення. Спостерігалася ситуація, яку чекали лише з 2014 року [10, 11], коли орбіти перших ГО почнуть повертатися в площину екватора.

Середня на 40-денному проміжку ймовірність зіткнення в січні – лютому, 2010 року зросла в ~ 3 рази, до $1 \cdot 10^{-8}$ (рис. 1, точка b і рис. 3). Цей максимум ймовірності в більшій мірі зумовлений проходженням через нульовий нахил орбіти об'єкта 06053С, ніж невдалими спробами вивести в безпечну зону відпрацьованих об'єктів в 2009 році.

На рис. 4 наведено розподіл небезпечних наближень НГО на мінімальну відстань до активних супутників в інтервалі 2007 – 2010 рр. По вісі ординат – відстань r мінімального зближення об'єктів. Кружечки – наближення геосинхронного об'єкта 08022В.

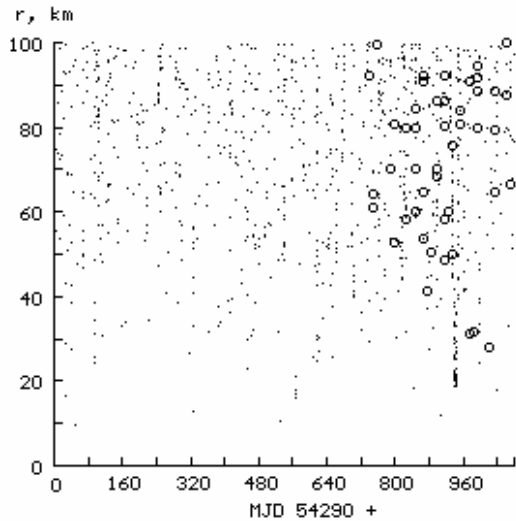


Рис. 4. Розподіл за часом небезпечних наближень НГО до активних супутників в інтервалі з липня 2007 року по червень 2010 року. Кружечки – небезпечні наближення НГО 08022В.

Послідовність небезпечних наближень об'єкта 06053С до активних ГС відображена у вигляді довгого піка, направленого вниз, з вершиною на 942 день від початку відліку, 5 лютого 2010 року. Переміщення об'єкта 06053С на відстані до 100 км від геостаціонарної орбіти відбувалося протягом ~26 діб, з 22 січня по 16 лютого 2010 року.

На рис. 5 наведений розподіл за географічною довготою небезпечних наближень на відстань r НГО до активних

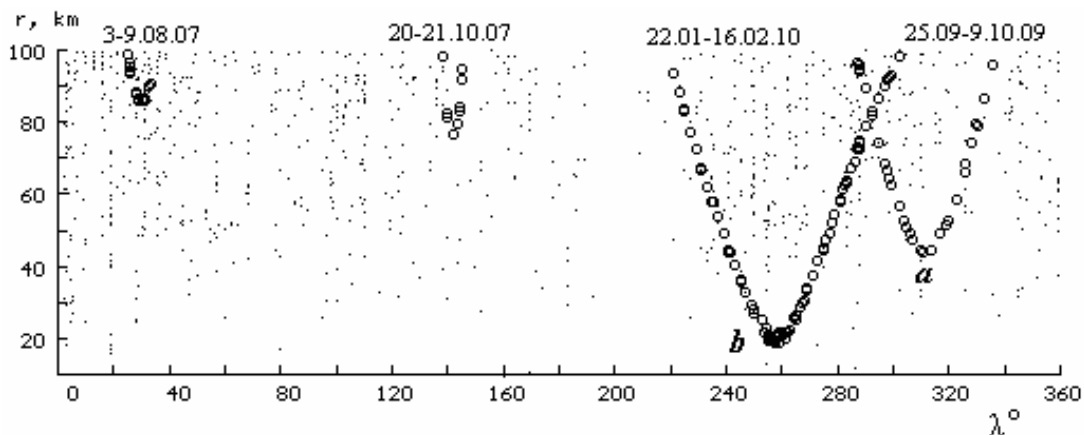


Рис. 5. Розподіл за географічною довготою підсупутникової точки небезпечних наближень НГО до активних супутників в інтервалі з липня 2007 року по червень 2010 року.

Точність орбіти об'єкта FengYun 2D АКМ в каталогах ESA

Приведені вище міркування щодо об'єкта 06053С і ризику його зіткнення на GEO виконуються при умові достовірності його елементів орбіт в каталогах ESA.

супутників в інтервалі 3 років – з VII.2007 по VI.2010. Небезпечні наближення супутника 06053С до активних супутників показані кружечками. Вони, зокрема, утворюють дві V-подібні фігури: більша, з вершиною b – в області довгот (220° ; 303°), проходження через небезпечну зону відбувалося в січні-лютому 2010 року; менша, з вершиною a – на довготах (287° ; 334°), проходження – в вересні-жовтні 2009 року.

Вершинам a і b відповідають максимуми зміни нахилу i з такими ж позначеннями на рис. 1. Мінімальний нахил i не обов'язково співпадає по часу з максимальною ймовірністю зіткнення. Більше того, мінімальний нахил може створювати два максимуми ймовірності.

У супутника 08022В не могло утворитися окремого максимуму (рис. 1), так як його небезпечні наближення до активних супутників (кружечки на рис. 4) розподілені досить рівномірно по часу. Він міг лише підсилити два максимуми, зумовлені НГО 06053С.

Короткочасні проходження через небезпечну зону НГО 06053С відбувалися також в серпні і жовтні 2007 року (рис. 5). Кожний раз послідовність проходжень (їх було 4) розподілялась в бік менших довгот, тобто на захід.

Сумніви викликані зауваженнями, що приводяться в кожному випуску каталогу ESA, про обмежену точність орбіт в цих каталогах і проведеними раніше дослідженнями [7, 8, 12] точності каталогів ESA на 2003, 2004, 2005, 2006 роки. Оцінювання точності орбіти об'єкта 06053С в

каталогах ESA [1, 2, 3] проводилося шляхом порівняння координат даного супутника на певному відрізку часу, знайдених на основі елементів орбіт з цих каталогів. Об'єкт 06053С міститься в [1, 2, 3] відповідно під номерами 198, 208 і 222 в таблицях орбіт дрейфуючих супутників цих каталогів на кінець 2007, 2008 і 2009 року. Були обчислені географічні довготи λ і широти φ підсупутникових точок на моменти часу $UT = 0^h$ з певним кроком протягом 2008 року за елементами орбіт з цих трьох каталогів. Відповідні значення приведені на рис. 6.

Відхилення точок за даними випуску 12 каталогу ESA на рис. 6 зумовлені не похибками, а іншими моментами часу, для яких програма обчислювала координати φ і λ . Криві зміни φ і λ для всіх трьох випусків каталогу ESA майже співпадають. При обчисленні нев'язок $\Delta\lambda$ і $\Delta\varphi$ спочатку шляхом інтерполяції кожену пару значень (для двох випусків каталогу) приводили до однакового моменту часу.

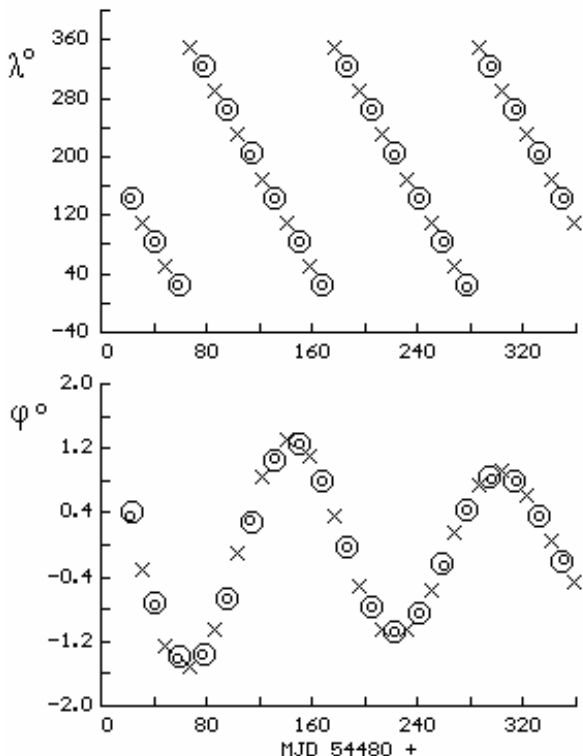


Рис. 6. Значення географічних довгот і широт підсупутникових точок дрейфуючого супутника 06053С протягом 2008 року за елементами орбіт трьох випусків каталогів ESA – 10 (хрестики), 11 (малі кружечки) і 12 (великі кружечки).

Були обчислені середні за 2008 рік нев'язки $\Delta\lambda_{10,11}$ і $\Delta\varphi_{10,11}$, отриманих координат за випусками 10 і 11 каталогу ESA і, відповідно, нев'язки $\Delta\lambda_{11,12}$ і $\Delta\varphi_{11,12}$ – за випусками 11 і 12 каталогу ESA:

$$\Delta\lambda_{10,11} = 1.91^\circ \pm 1.19^\circ, \Delta\varphi_{10,11} = 0.02^\circ \pm 0.02^\circ;$$

$$\Delta\lambda_{11,12} = 5.95^\circ \pm 2.23^\circ, \Delta\varphi_{11,12} = 0.06^\circ \pm 0.04^\circ.$$

З цих результатів слідує, що елементи орбіти супутника 06053С в 10 і 11 випусках каталогу ESA є досить точними. Трохи менша точність в 12 випуску каталогу. Велике значення $\Delta\lambda_{11,12}$ може бути частково зумовлене похибкою інтерполяції. Точність орбіти супутника 06053С в каталогах ESA є достатньою для статистичних досліджень.

Висновки

Проведені дослідження показали, що рекомендації IADC щодо захисту від «космічного сміття» геостаціонарної орбіти були сприйняті більшістю космічних держав позитивно. Так, протягом 8 років ризик зіткнення на геостаціонарній орбіті в цілому змінювався мало. Але на окремих інтервалах часу він може збільшуватися в 3 – 4 рази через об'єкти, які не вдалося вивести за межі захищеної зони GEO.

Повернення площини орбіти в площину екватора відбувається не тільки через 53 роки (період зміни нахилу) після переходу об'єкта на некеровану орбіту, але і через 2 – 4 роки внаслідок невдалого виведення супутника на геостаціонарну орбіту. Таким виявився, наприклад, тайландський супутник 97016А (Thaicom 3), невдало запусканий в 2006 році. Його нахил орбіти i зменшувався, а в кінці грудня 2009 року досяг нульового значення, що привело до збільшення ризику зіткнень об'єктів на геостаціонарній орбіті в кілька разів. Орбіта цього супутника на початку 2010 року знаходилася вище GEO на 60 км. Ще небезпечнішими стають ті супутники, що перетинають GEO.

Виявилось, що максимум ризику зіткнення об'єктів може не співпадати з часом повернення орбіти НГО в площину екватора. До того ж окремих максимумів може бути, як мінімум, два.

Література

1. Choc R., Jehn R. Classification of geosynchronous objects. – Issue 10. – Darmstadt: ESA ESOC, febr. 2008. – 120 p.
2. Choc R., Jehn R. Classification of geosynchronous objects. – Issue 11. – Darmstadt: ESA ESOC, febr. 2009. – 122 p.
3. Choc R., Jehn R. Classification of geosynchronous objects. – Issue 12. – Darmstadt: ESA ESOC, febr. 2010. – 127 p.
http://www.lfvn.astronomer.ru/files/COG_O-issue12.pdf
4. Мотрунич І.І., Клімик В.У. та ін. // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. – Ужгород: УжНУ, 2005. – Вип.18. – С. 25-31.
http://www.nbu.gov.ua/Portal/natural/Nvunu/Fiz/2005_18/Motr.pdf
5. Єпішев В.П., Мотрунич І.І., Клімик В.У. // Космічна наука і технологія. – Т. 10, №5/6. – К.: НКАУ, НАНУ, 2004. – С. 159-163.
6. Клімик В., Кізуун Л. // Кинематика і фізика небесних тел. Приложение. – № 5 – Киев: НАНУ, 2005. – С. 393-397.
7. Єпішев В.П., Мотрунич І.І. и др. // Околосемная астрономия - 2007. (Матер. Междун. конф. 2007 г. в Терсколе) – Нальчик, Россия: НАНУ, ИА РАН, 2008. – С. 321-326.
8. Єпішев В.П., Мотрунич І.І. та ін. // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. – Ужгород: УжНУ, 2008. – Вип.23. – С. 172-177.
9. Arregui J.P., Jehn R. Classification of geosynchronous objects. – Issue 9. – Darmstadt: ESA ESOC, febr.2007. – 119 p.
10. Єпішев В.П., Мотрунич І.І. та ін. // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. – Ужгород: УжНУ, 2006. – вип.19. – С. 181-187.
11. Єпішев В.П., Мотрунич І.І., Клімик В.У. // Космічна наука і технологія. – Т. 13, № 1. – К.: НКАУ, НАНУ, 2007.
12. Кудак В.І., Єпішев В.П., Клімик В.У. // Вторая международная науч.-практич. конф. “Университетские микроспутники – перспективы и реальность”. – Днепропетровск: НКАУ, НЦУВКЗ, 2007. – С. 16-21.

GEOSTATIONARY ORBIT OCCUPANCY AND RESULTS OF ITS CONTROL

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

Uzhhorod National University, Laboratory of space researches
Daleka Str. 2a, 88000, Uzhhorod, Ukraine

The variation of a risk of collision on geostationary orbit is determined during last 8 years. On the average he has changed poorly except for two strong jumps. Is established, that the returning of orbit of drifting object in an equatorial plane can be found not only after 53 years after he became to uncontrolled state, but also through 2 - 4 years after unsuccessful launch of a satellite into orbit. In particular, at the end of December, 2009 the inclination of orbit of the satellite 97016A has passed through zero value. As a result of this risk of collisions of uncontrolled satellites with active satellites was increased in 3 - 4 times. His maximum does not coincide with the moment of returning of object in an equatorial plane. Such maximum of collision risk probability can be two.

Key words: geosynchronous satellites, geostationary orbit, risk of collision, returning of orbit in an equatorial plane.

ЗАСЕЛЁННОСТЬ ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЁ КОНТРОЛЯ

**В.У. Климик, В.П. Епишев, В.И. Кудак, И.И. Мотрунич,
А.М. Мацо**

Ужгородский национальный университет, Лаборатория космических исследований
ул. Далёкая, 2а, 88000, Ужгород

Определено изменение риска столкновения на геостационарной орбите на протяжении последних 8 лет. В среднем он изменился мало за исключением двух сильных скачков. Установлено, что возвращение орбиты дрейфующего объекта в плоскость экватора может наблюдаться не только через 53 года после его выведения из рабочего режима, но и через 2 – 4 года после неудачного запуска ГСС на орбиту. В частности, в конце декабря 2009 года наклон орбиты Таиландского спутника 97016А прошёл через нулевое значение. В результате этого риск столкновения неуправляемых спутников с активными увеличился в 3 – 4 раза. Его максимум не совпадает с моментом возвращения объекта в плоскость экватора. Больше того, таких максимумов может быть два.

Ключевые слова: геосинхронные спутники, геостационарная орбита, риск столкновения, возвращение орбиты в плоскость экватора.