

УДК 521.1

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

Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету, Ужгород

## **СТАН ЗАСМІЧЕНОСТІ ЗАХИЩЕНОЇ ЗОНИ ГЕОСТАЦІОНАРНОЇ ОРБИТИ ПРОТЯГОМ 2007—2009 рр.**

---

*Аналізується виконання рекомендацій IADC в 2007—2009 рр. про захищену зону геостаціонарної орбіти. Обчислено зміну ризику зіткнення на геостаціонарній орбіті в цей трьохрічний період. Вона порівнюється з ризиком зіткнення у попередні п'ять років. Виявлено дрейфуючий об'єкт, нахил орбіти якого на початку 2010 р. пройшов через нульове значення. Досліджено вплив цього явища на ризик зіткнення з активними супутниками.*

---

У 1997 р. Міжвідомчий координаційний комітет з космічного сміття (IADC, Inter-Agency Space Debris Coordination Committee) прийняв рекомендації, згідно з якими зона на 200 км вище і на 200 км нижче геостаціонарної орбіти (GEO) вважається захищеною. Всі геостаціонарні супутники (ГС), ресурс яких закінчується, рекомендується виводити на геосинхронні орбіти, перигей яких не менше ніж на 300 км вищий за GEO, бо некеровані геосинхронні об'єкти (НГО), які перебувають у смузі між 200 і 300 км вище GEO, в результаті еволюції орбіти можуть заходити в 200-км захищену зону.

Починаючи з 1998 р. провідні оператори космічних апаратів намагалися виконувати рекомендації IADC про захищену зону GEO. Через 10 років здавалося, що рекомендації IADC стають стандартною процедурою з усе меншою кількістю виключень. У 2007 р. лише один відпрацьований супутник (92043A) почав дрейфувати по орбіті, що входила в захищену зону [8]. Також один об'єкт (93062A) залишився на лібраційній орбіті. Та в наступні два роки кількість об'єктів, що входили на геосинхронну орбіту у 200-км захищеній зоні, різко збільшилась до 9 і 12 об'єктів (табл. 1) [8, 9, 10]. На орбіті з перигеєм на 300 км

вище GEO виводилось значно менше половини об'єктів.

У табл. 2 наведено дев'ять найнебезпечніших об'єктів, які з'явилися в 2007—2009 рр. Всі вони дрейфують. Натомість вклад лібраційних об'єктів у ризик зіткнення на геосинхронній орбіті дуже малий: кількість небезпечних наближень лібраційних об'єктів до керованих ГС складає близько 0.1 % від усіх небезпечних зближень НГО з активними ГС [6].

Наведені в останній графі табл. 2 від'ємні значення різниць  $r_{\text{пер}} - r_{\text{GEO}}$  відстані перигею від центру Землі і радіуса геостаціонарної орбіти означають, що НГО в перигей знаходяться ближче до поверхні Землі, ніж GEO. Таких НГО в приведеній таблиці є два: 08022В і 99009А. При нульових значеннях нахилу орбіти ці НГО двічі на добу перетинають геостаціонарну орбіту.

### **РИЗИК ЗІТКНЕННЯ НА ГЕОСТАЦІОНАРНІЙ ОРБИТІ ПРОТЯГОМ 2007—2010 рр.**

Для дослідження ризику зіткнення ми використали три випуски каталогу ESA, що вийшли на початку 2008, 2009, 2010 рр. [8, 9, 10]. В них приведені елементи орбіт ГО на кінець попереднього року. За елементами орбіт з цих каталогів побудовано графік зміни ймовірності зіткнення за добу на GEO протягом трьох років: з липня 2007 р. по червень 2010 р. (рис. 1, крива 1). Ця

крива складається з трьох річних інтервалів. Центр кожного інтервалу, кінець грудня, збігається з епохою відповідного каталогу ESA, за орбітами якого будувалась річна крива. Центри трьох інтервалів на рис. 1 показано на осі часу трьома довгими рисками.

Крива *I* на рис. 1 побудована за середніми на проміжку 40 діб значеннями ймовірності *P* зіткнення на GEO протягом доби. Ймовірність *P* з достатньою точністю можна визначати як добуток кількості  $n_{\text{набл}}$  небезпечних наближень НГО до керованого ГС (на відстань до 100 км) на ймовірність зіткнення  $P_z$  при небезпечному наближенні:  $P = n_{\text{набл}} \cdot P_z$ .

Небезпечні наближення оцінювалися шляхом визначення положення всіх каталожних НГО з певним достатньо малим кроком  $\Delta t$  і порівнянням на кожному кроці положення НГО з положенням всіх активних ГС. В основу програми обчислення положення супутника покладено аналітичну теорію руху ГО, за якою похибка обчисленого положення ГО на часовому інтервалі до 2 років не перевищує 75 км (приблизно  $0.1^\circ$  по довготі). Теорія враховує голов-

ні збурення гравітаційного походження: неоднорідність гравітаційного поля Землі, тяжіння Місяця і Сонця.

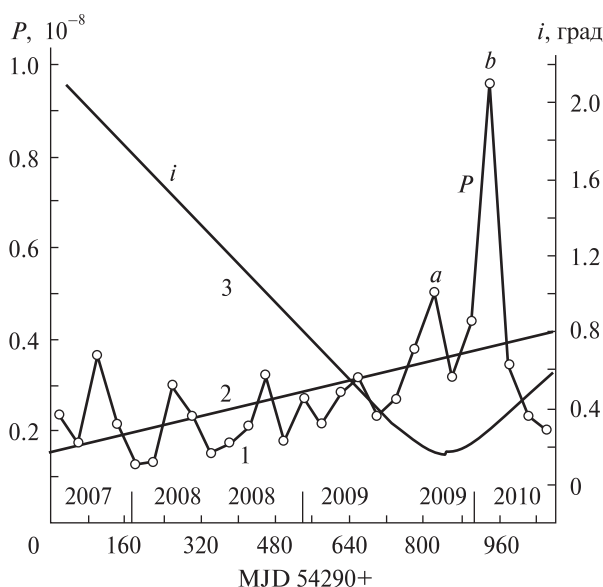


Рис. 1. Зміна ймовірності зіткнення на геостаціонарній орбіті протягом доби на інтервалі трьох років (*I*), лінія регресії (*2*) і зміна нахилу *i* орбіти супутника 06053С (*3*)

Таблиця 1. Кількість нових некерованих геосинхронних об'єктів, що з'явилися на навколосезних орбітах в 2007—2009 рр. за даними каталогів ESA

Тип об'єкта	2007 р.	2008 р.	2009 р.
Всього нових некерованих об'єктів на GEO	13	16	24
З них задовольняють рекомендаціям IADC про захищену зону	11	6	11
Кількість об'єктів, що близькі до захищеної зони	—	1	1
Кількість нових НГО, що не задовольняють рекомендаціям IADC	2	9	12

Таблиця 2. Найнебезпечніші геосинхронні об'єкти, які з'явилися в 2007—2009 рр.

Номер п/п	Номер COSPAR і назва об'єкта	Країна і рік переходу на некеровану орбіту	$r_{\text{пер}} - r_{\text{GEO}}$ , км
1	92043A Gorizont 26	Росія, 2007	160, 420
2	00002A Galaxy 10R	США, 2008	170, 190
3	08022B Zenith-3SLB	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

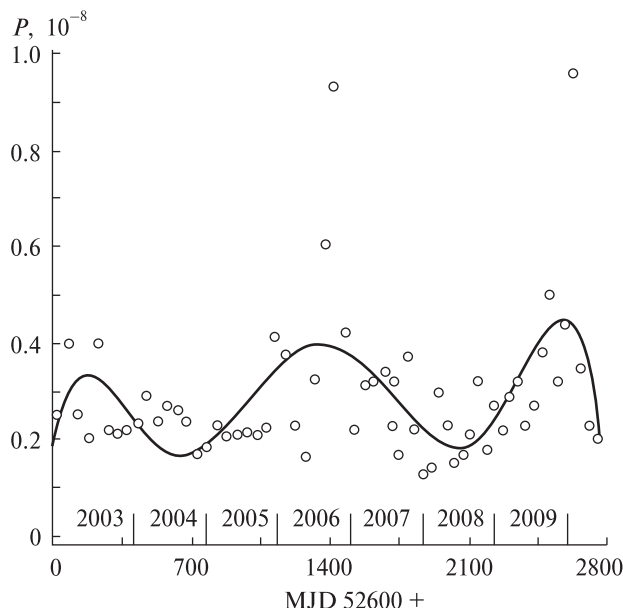


Рис. 2. Зміна ймовірності зіткнення за добу на GEO протягом 2003—2010 рр.

Через те що розрахунки проводилися у системі  $\phi, \lambda, r$ , де  $\phi$  і  $\lambda$  — географічні координати підсупутникової точки, а  $r$  — геоцентрична відстань до НГО, то достатньо було брати  $\Delta t = 0.01$  доби. При виявленні небезпечного наближення визначалася мінімальна відстань між супутниками при їхньому зближенні.

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. Вважалося, що супутники торкнулися один одного, якщо відстань становить  $r_0 = 8$  м. 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

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

за значеннями частоти  $p_i$  небезпечних зближень, приведеної до одиничного відрізка  $\Delta r_0 = 1$  м відстані  $r$  між супутниками:

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

де крок  $\Delta r = 5$  м. При обчисленні інтегралу (1) достатньо обмежитися членом 1-го порядку. Отримаємо  $P_3 = a_1 \cdot r_0^2 / 2$ , де  $r_0 = 8$  м. Розрахунки показують, що ця ймовірність близька до значення  $P_3 = 3.0 \cdot 10^{-9}$ . За цією величиною проводилися обчислення ризику зіткнення об'єктів на геостационарній орбіті в роботах [1, 2, 4, 6, 11].

За знайденими ймовірностями зіткнення за добу  $P$  на GEO в інтервалі 3 років побудовано пряму регресії (крива 2 на рис. 1) зміни ймовірності  $P$ :

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

коефіцієнт кореляції  $\rho = 0.45$ . Час  $t$  у виразі (2) вимірюється в добах з початком відліку 1 липня 2007 р. Очевидно, коефіцієнт прямої (2)  $k = 0.000246 \cdot 10^{-8}$  — це середня зміна за добу ймовірності зіткнення на GEO. З виразу (2) випливає, що в останні три роки ймовірність зіткнення на GEO в середньому щорічно збільшувалася на  $0.09 \cdot 10^{-8}$ . Протягом попереднього 5-річного інтервалу (2002—2007 рр.) ця ймовірність збільшувалася значно повільніше — на  $0.03 \cdot 10^{-8}$  щорічно [1, 4]. Проте середня ймовірність у цих двох часових інтервалах практично не змінилася і складає  $0.3 \cdot 10^{-8}$ . Це 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. 2 наведено ймовірності зіткнення за добу на GEO протягом 2003—2010 рр., де було використано значення ймовірності з рис. 1 і ймовірності зіткнення в 2003—2007 рр. за даними [1]. Середня ймовірність зіткнення за добу за ці 8.5 років змінилася мало і складає  $P_{cp} = (0.29 \pm 0.15) \cdot 10^{-8}$ . Відповідно, лінія регресії  $P = k \times (\text{MJD} - 52600) + b$  має коефіцієнт  $k = 0.000032 \times 10^{-8}$ , звідки отримуємо, що за 8 років ймовірність збільшилася на  $0.09 \cdot 10^{-8}$ .

Крива на рис. 2 — це поліном 6-го степеня, побудований за принципом найменших квадратів. Такий поліном може мати до п'яти екстремумів. Два більші максимуми припадають на 2006 р., коли з'явився дуже небезпечний дрейфуючий супутник 97016A («Тайсон 3»), і на 2009—2010 рр. після ряду невдалих відправлень відпрацьованих

ГС за межі захищеної зони GEO. Зокрема, 10 % всіх небезпечних наближень на період липень 2009 — червень 2010 рр. припадає на НГО 08022В (табл. 2), в якого перигей і апогей знаходяться по різні боки GEO. У нього великий дрейф ( $\dot{\lambda} = -17^\circ/\text{добу}$ ), і на початку переходу на орбіту дрейфу нахил орбіти був близький до нуля.

Але найнебезпечнішим в 2009—2010 рр. виявився об'єкт 06053С, який наближався на небезпечну відстань (до 100 км) в 2007—2010 рр. 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  $86.5^\circ$ , з'явився на орбіті дрейфу у 2006 р. [7]. Він зміщується з дрейфом  $\dot{\lambda} = -3.3^\circ/\text{добу}$ . Перигей і апогей знаходилися відповідно на 184 км нижче і на 700 км вище за GEO. Небезпека полягала в тому, що малий нахил орбіти зменшувався (рис. 1, крива 3) і в кінці жовтня 2009 р. відбувся його перехід через нульове значення. Спостерігалася ситуація, яку чекали лише з 2014 р. [3], коли орбіти перших НГО почнуть повертатися у площину екватора.

Середня на 40-денному проміжку ймовірність зіткнення у січні—лютому 2010 р. зросла приблизно у три рази, до  $1 \cdot 10^{-8}$  (рис. 1, точка *b* і рис. 2). Цей максимум ймовірності більшою мірою зумовлений проходженням через нульовий нахил орбіти об'єкта 06053С, ніж невдалими спробами вивести у безпечну зону відпрацьовані об'єкти у 2009 р.

На рис. 3 наведено мінімальні відстані  $r$  НГО до активних супутників при небезпечних наближеннях на інтервалі травень 2009 — червень 2010. Кружечки — наближення геосинхронного об'єкта 08022В. Послідовність небезпечних наближень об'єкта 06053С до активних ГС на рис. 3 відображена у вигляді довгого піка, направлено вниз, з вершиною на 262-й день від початку відліку (9 травня 2009 р.). Вхідження об'єкта 06053С на відстань до 100 км від GEO відбувалося щоденно протягом 26 діб, з 22 січня по 16 лютого 2010 р. Найнебезпечнішими були 8—9 лютого 2010 р. — вершина піка на рис. 3.

На рис. 4 наведено розподіл за географічною довготою небезпечних наближень на відстань  $r$

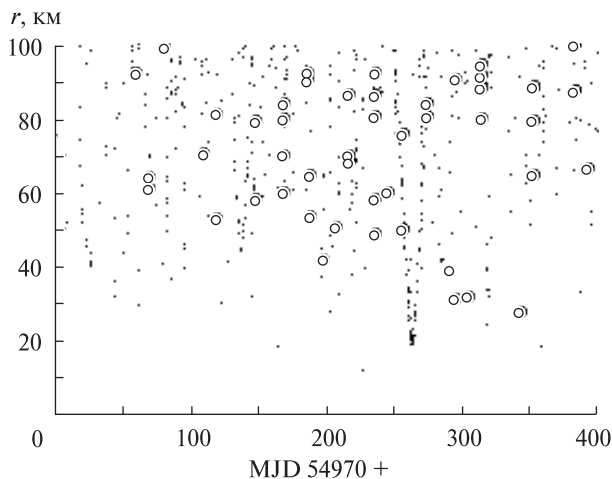


Рис. 3. Мінімальні відстані при небезпечних наближеннях НГО до активних супутників в інтервалі з травня 2009 по червень 2010. Кружки — небезпечні наближення НГО 08022В

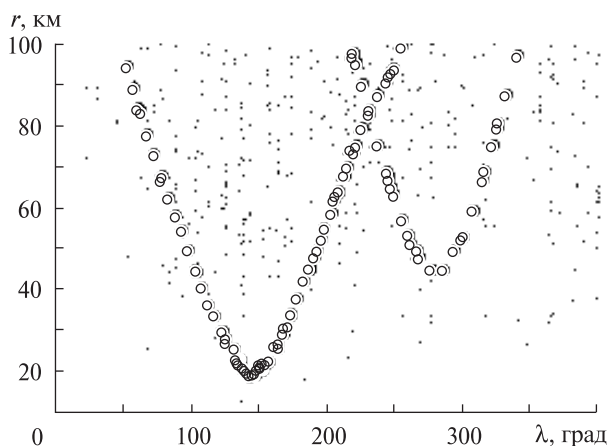


Рис. 4. Розподіл по географічній довготі підсупутникової точки в інтервалі  $(200...360^\circ)$  небезпечних наближень НГО до активних супутників протягом липня 2007 р. — червня 2010 р.

НГО до активних супутників в інтервалі трьох років — з липня 2007 по червень 2010 рр. Показано лише інтервал довгот з 200 по  $360^\circ$ . Небезпечні наближення супутника 06053С до активних супутників позначені кружечками. Вони, зокрема, утворюють дві V-подібні фігури: більша — в області довгот  $(220^\circ; 303^\circ)$ , проходження через небезпечну зону відбувалося у 2010 р. з 22 січня по 16 лютого; менша — на довготах  $(287^\circ;$

334°), проходження в 2009 р. — з 25 вересня по 9 жовтня.

Вершинам на рис. 4 відповідають на рис. 1 максимумами  $b$  і  $a$  змін ймовірності зіткнення  $P$ . Мінімальний нахил  $i$  не обов'язково збігається по часу з максимальною ймовірністю зіткнення (рис. 1). Більше того, мінімальний нахил може створювати два максимума ймовірності.

У супутника 08022В не могло утворитися окремого максимуму на рис. 1, бо його небезпечні наближення до активних супутників (кружки на рис. 3) розподілені досить рівномірно по часу. Він міг лише підсилити два максимума на рис. 1, зумовлені НГО 06053С.

Проходження через небезпечну зону НГО 06053С відбувалися також у серпні і жовтні 2007 р., але тоді кількість небезпечних наближень була значно меншою, а відстань  $r$  між супутниками — більшою.

#### ПОРІВНЯННЯ ОРБИТИ ОБ'ЄКТА FENGYUN 2D В КАТАЛОГАХ ESA ЗА 2007—2009 РР.

Приведені вище міркування щодо об'єкта 06053С і ризику його зіткнення на GEO виконуються при умові достовірності його елементів орбіт в каталогах ESA. Сумніви викликані зауваженнями, що приводяться в кожному випуску каталогу ESA, про обмежену точність орбіт в цих каталогах та дані раніше проведених досліджень [1, 4, 5] точності каталогів ESA на 2003, 2004, 2005, 2006 рр.

Оцінювання точності орбіти об'єкта в каталогах ESA [8—10] проводилося шляхом порівняння координат даного супутника протягом року, знайдених на основі елементів орбіт двох каталогів. Об'єкт 06053С в каталогах [8—10] має номери 198, 208 і 222 на кінець 2007, 2008 і 2009 рр. відповідно. Були обчислені географічні довготи  $\lambda$  і широти  $\varphi$  підсупутникових точок на моменти часу  $UT = 0^h$  з певним кроком  $\Delta t$  протягом 2008 р. за елементами орбіт з цих трьох каталогів. Криві зміни  $\varphi$  і  $\lambda$  протягом 2008 р. за всіма трьома випусками каталогу ESA майже збігаються. При обчисленні нев'язок  $\Delta\lambda$  і  $\Delta\varphi$  спочатку шляхом інтерполяції кожену пару значень (для двох випусків каталогу) приводили до однакового моменту часу. Були обчислені середні за 2008 р.

нев'язки  $\Delta\lambda_{10,11}$  і  $\Delta\varphi_{10,11}$  отриманих координат за випусками 10 і 11 каталогу ESA та, 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 отриманих результатів випливає, що елементи орбіти супутника 06053С в 10-му і 11-му випусках каталогу ESA є досить точними. Трохи менша точність у 12-му 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.

#### ВИСНОВОК

Середня ймовірність зіткнення на геостационарній орбіті протягом останніх восьми років змінювалася мало, але на деяких інтервалах часу вона збільшувалася у три-чотири рази через окремі об'єкти, які не вдалося вивести за межі захищеної зони GEO. Збільшення ймовірності може відбуватися через декілька років після невдалого виведення об'єкта на геостационарну орбіту — в результаті переходу його орбіти у площину екватора. Нові НГО, які проходять через захищену зону GEO і мають малий нахил орбіти, який зменшується, є найнебезпечнішими.

1. Єпішев В. П., Мотрунич І. І., Клімик В. У. и др. Исследование причин роста вероятности столкновения на геостационарной орбите // Околосемная астрономия — 2007. — Нальчик, Россия: НАНУ, ИА РАН, 2008. — С. 321—326.
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. Єпішев В. П., Мотрунич І. І., Клімик В. У. Повернення орбіт геосинхронних об'єктів у площину екватора і ризик зіткнення на геостационарній орбіті // Космічна наука і технологія. — 2007. — **13**, № 1. — С. 49—53.
4. Єпішев В. П., Мотрунич І. І., Клімик В. У., Мацо Г. М. Точність орбіт некерованих супутників в каталогах геосинхронних об'єктів ESA // Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Фізика. — 2008. — Вип. 23. — С. 172—177.

5. Кудак В. І., Єнішев В. П., Клімик В. У. Вплив засміченості зони геосинхронних орбіт на функціонування активних супутників. // Вторая междунар. науч.-практич. конф. «Университетские микропутники — перспективы и реальность»: Сб. матер. конф., Евпатория, 26—30 июня 2007 г. — Днепропетровск, 2007. — С. 16—21.
6. Мотрунич І. І., Клімик В. У., Кудак К. А., Мацо Г. М. Ризик зіткнення космічних об'єктів на геосинхронних орбітах // Наук. вісник Ужгород. ун-ту. Фізика. — 2005. — Вип. 18. — С. 25—31. — [http://www.nbu.gov.ua/Portal/natural/Nvunu/Fiz/2005\\_18/Motr.pdf](http://www.nbu.gov.ua/Portal/natural/Nvunu/Fiz/2005_18/Motr.pdf)
7. Arregui J. P., Jehn R. Classification of geosynchronous objects. — Darmstadt: ESA ESOC, 2007. — N 9. — 119 p.
8. Choc R., Jehn R. Classification of geosynchronous objects. — Darmstadt: ESA ESOC, 2008. — N 10. — 120 p.
9. Choc R., Jehn R. Classification of geosynchronous objects. — Darmstadt: ESA ESOC, 2009. — N 11. — 122 p.
10. Choc R., Jehn R. Classification of geosynchronous objects. — Darmstadt: ESA ESOC, 2010. — N 12. — 127 p. — <http://www.lfvn.astronomer.ru/files/COGO-issue12.pdf>
11. Klimik V., Kizyun L. Hazard of collisions in geostationary ring. // Кинематика и физика небес. тел. Приложение. — 2005. — № 5. — С. 393—397.

Надійшла до редакції 28.10.10

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

#### IMPURITY CONDITION OF THE PROTECTED AREA OF GEOSTATIONARY ORBIT OVER THE LAST THREE YEARS

We analyse IADC recommendations concerning the protected area of the geostationary orbit from 2007 to 2009. The change in the risk of collision in the geostationary orbit during this time interval is calculated and compared with the risk of collision over the previous five years. A drifting object is detected, the orbit inclination of which passed through zero at the beginning of 2010. The influence of this phenomenon on the risk of collision with controlled satellites is investigated.