

и DORIS-технологий в 2-3 раза выше, чем амплитуды X и Y -составляющих.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вариации движения центра масс Земли могут быть соответствующим образом учтены при определении положений станций слежения в опорной земной системе координат, что особенно важно для альтиметрических измерениях уровня мирового океана, изучения тектонического движения материковых плит и для усовершенствования геофизических моделей. Колебания геоцентра, определенные с помощью технологий GPS, DORIS и SLR, составляют 1.2—18.5 мм по каждой координате, причем Z -составляющая для GPS- и DORIS-измерений в 2-3 раза выше, чем X и Y . Наши исследования в области мониторинга движения геоцентра будут продолжены как в области анализа временных рядов движения геоцентра большей временной продолжительности, так и в выявлении вклада различных физических явлений, происходящих в различных компонентах земной системы и влияющих на процесс движение геоцентра.

1. Boucher C., Sillard P. Synthesis of submitted geocenter time series // IERS Technical Note 25. IERS Analysis Campaign to Investigate Motions of the Geocenter / Ed. by J. Ray. —

- Observatoire de Paris, April 1999.—P. 15—21,
2. Dong D., Dickey J. O., Chao Y., Chehg M. K. Geocenter variations caused by atmosphere, ocean and surface ground water // Geophys. Res. Lett.—1997.—24.—P. 1867—1870.
3. Kuzin S. P., Tatevian S. K. DORIS data analysis at the Institute of Astronomy // Proc. of DORIS DAYS, 2-3 may, 2000, Toulouse, France. 2000.
4. Kuzin S. P., Tatevian S. K. On Computation of Weekly Doris Solutions for 1999—2001 Time Period // Proc. of the IDS workshop, Biarritz — France, 13-14 June 2002. http://ids.cls.fr/html/report/ids_workshop_2002/programme.html
5. Montag H. Geocenter motions derived by different satellite methods // IERS Technical Note 25. IERS Analysis Campaign to Investigate Motions of the Geocenter / Ed by J. Ray. — Observatoire de Paris, April 1999.—P. 71—74.

MONITORING OF THE GEOCENTRE MOTIONS ON THE BASIS OF DORIS, GPS, AND SLR DATA

S. P. Kuzin, S. K. Tatevian

We give the results of regression analysis of geocentre variations time series which are derived at the Institute of Astronomy of RAS on the basis of DORIS data for a time interval of 1999.2 to 2002.6. In addition, we present the results of analysis of geocentre variations on the basis of DORIS (IGN/JPL analysis centre) and GPS (JPL) data for ten-year period of time as well as on the basis of SLR (CSR) data for eight-year period of time. Annual and semiannual signals with amplitudes from 1.2 to 18.5 mm and some shorter periods are found for all time series. The amplitudes of some short-periodic signals are comparable with the amplitudes of semiannual signals. The secular trend of the geocentre motion with a velocity of a few millimetres per year is found.

УДК 521.9 (085)

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

Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету, Ужгород

РИЗИК ЗІТКНЕННЯ ШТУЧНИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ СИНХРОННИХ ОРБИТАХ

Наводиться просторовий розподіл некерованих об'єктів в зоні геосинхронних супутників, розподіли елементів орбіт цих об'єктів, параметрів відносного руху при їхньому зближенні з активними геостационарними супутниками. Досліджуються ймовірності зіткнення некерованих об'єктів і ймовірності їхнього зіткнення з активними геостационарними супутниками.

Розподіл некерованих супутників на геосинхронних орбітах. Положення некерованих об'єктів на геосинхронних орбітах визначаємо трьома координатами — географічними довготою λ і широтою φ (або δ) підсупутникової точки та геоцентричною відстанню до супутника r . Для отримання розподілу каталожних некерованих геосинхронних об'єктів (НГО) прослідковуємо положення всіх НГО протягом певного проміжку часу Δt (з 1990 по

2004 р.) з кроком 0.01 доби. Послідовно знаходимо просторові координати λ , φ , r всіх об'єктів на моменти часу t , які дають миттєві розподіли НГО. Усереднюючи ці положення по всіх t , одержимо розподіл НГО на проміжку часу Δt . Розрахунки орбіт проводились на основі аналітичної теорії руху ГО, що враховує несферичність Землі, збурення з боку Сонця та Місяця [1]. Точність обчислення положення ГО на часовому проміжку 15 років

становить 1° .

Розподіл топоцентричного схилення δ для пункту Ужгород будовався за точками $(\delta_i, m_i/(n\Delta\delta))$, де $\Delta\delta$ — довжина інтервалів розбиття ($\Delta\delta = 1^\circ$), δ_i — середина i -го інтервалу, m_i — кількість значень δ , що попадають в i -й інтервал, n — кількість всіх значень δ . Розподіл схилень симетричний відносно середнього значення ($\delta_{\text{сеп}} = -6.2^\circ$), але не є нормальним (кривою Гаусса). Функція густини розподілу географічної широти φ НГО мало відрізняється від кривої розподілу значень $\delta + 6.2^\circ$.

Функція густини розподілу геоцентричної відстані r до НГО симетрична відносно середнього значення $\bar{r}_{\text{сеп}} = 42164$ км. Від кривої Гаусса вона відрізняється сильним максимумом в точці $\bar{r}_{\text{сеп}}$. Переважна більшість НГО розміщені у межах інтервалу $\bar{r} \pm 200$ км. Певний вплив на форму кривої створюють лібраційні супутники, розподіл яких має свої особливості: майже всі ці супутники знаходяться в інтервалі $\bar{r} \pm 30$ км.

Розподіл довготи λ підсупутникової точки НГО близький до рівномірного, але має складну багатопікову структуру. Найбільший максимум знаходиться біля точки лібрації $\lambda = 75^\circ$, де спостерігається скупчення лібраційних супутників типу l_1 .

Просторовий розподіл НГО по r і φ (рис. 1) будовався за даними, одержаними протягом 15 років. Коефіцієнт 736 на рис. 1 переводить φ в області НГО з кутових одиниць (радіан) в лінійні — км. На кривих вказано $m_{\varphi r}$ — кількість положень супутників вздовж всієї зони ГО в області розбиття $\Delta\varphi\Delta r = 5000$ км². Области розбиття показані на рис. 1 пунктирною координатною сіткою. Значення функції густини розподілу $P(\varphi, r)$ — ймовірності перебування супутника в кільці з площею поперечного перерізу 1 км² — можна визначити за формулою $P(\varphi, r) = m_{\varphi r}/\Delta\varphi\Delta r n$, де $n = 92\,207$ — вся кількість положень супутників, за якими

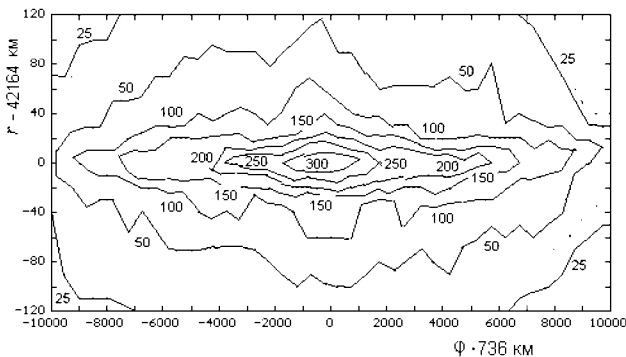


Рис. 1. Просторовий розподіл каталожних НГО за даними r і схилення φ протягом 15 років

проводились розрахунки. Функцію $P(\varphi, r)$ досить точно можна представити як неявну функцію рівнянням еліпса:

$$\frac{(736\varphi)^2}{[-29.83P(\varphi, r)k + 10953]^2} + \frac{(r - 42164)^2}{[0.001659P(\varphi, r)^2k^2 - 0.8621P(\varphi, r)k + 121.1]^2} = 1, \quad (1)$$

де $k = \Delta\varphi\Delta r n \approx 46 \cdot 10^7$. Залежність між великою піввісю a еліпса і величиною $P(\varphi, r)$ — лінійна з високим коефіцієнтом кореляції: $\rho = -0.995$. Залежність між малою піввісю b еліпса і $P(\varphi, r)$ складніша. Її ми оцінили параболою в області зміни b від 10 км до 120 км.

Розподіли елементів орбіт НГО. Для побудови кривої густини розподілу нахилу орбіти $P(i)$ (рис. 2) використані орбіти супутників з певним інтервалом на проміжку 15 років (1989—2004 рр.). Чітко виражений «гострий» максимум знаходиться в точці $i'_{\text{max}} = 11.6^\circ$. Є ще один невеликий максимум в точці $i''_{\text{max}} = 14.5^\circ$, зумовлений, очевидно, максимальним значенням нахилу орбіти ($i_{\text{max}} = 14.5^\circ$) більшості НГО.

Функція густини розподілу ексцентриситету e стрибкоподібно спадає до нуля. Найбільший максимум функції знаходиться в точці $e_{\text{max}} = 0.0005$. Ще два максимуми — в точках 0.0015 і 0.0025. Для більшості НГО ексцентриситет не перевищує 0.004.

Максимум функції густини розподілу довготи висхідного вузла $P(\Omega)$ (рис. 3) знаходиться поблизу точки $\Omega = 60^\circ$. Майже всі значення Ω знаходяться в інтервалі $(-60^\circ; 100^\circ)$. Це зумовлено тим, що на другій половині циклу зміни Ω висхідний і нисхідний вузли міняються місцями, бо площина орбіти супутника перетинає площину екватора.

Функція густини розподілу аргумента перигея ω змінюються дуже стрибкоподібно. Це можна пояснити невизначеністю величини ω при нульовому нахилі орбіти.

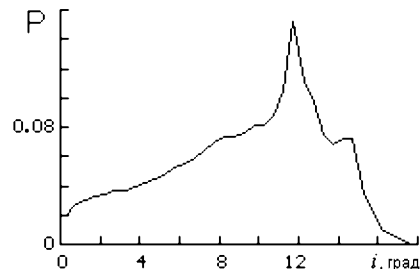


Рис. 2. Розподіл $P(i)$ нахилу орбіти НГО

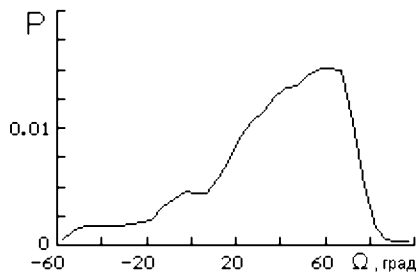


Рис. 3. Розподіл $P(\Omega)$ довготи висхідного вузла НГО

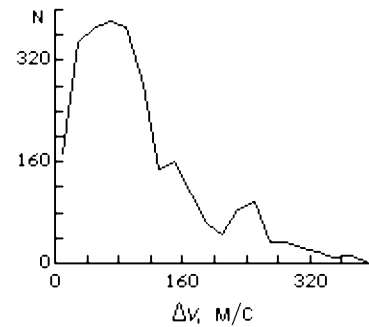


Рис. 4. Розподіл величин відносних швидкостей ГГО при небезпечних зближеннях НГО

Розподіл дрейфу НГО також побудовано за даними орбіт на проміжку 15 років. Найбільший максимум знаходиться в точці $\dot{\lambda} \approx -2^\circ$ за добу. Наступний за величиною — в точці $\dot{\lambda} \approx 0^\circ$ за добу. Переважають супутники з від'ємним дрейфом, тобто які рухаються на захід. Це пояснюється виводом активних ГГО, які відпрацювали свій ресурс, на зовнішні відносно зони активних ГГО орбіти. У більшості ГГО дрейф і крива розподілу дрейфу мало змінюється з часом. Цим пояснюється багатопіковий вигляд кривої густини розподілу.

Розподіл параметрів відносного руху супутників при небезпечних зближеннях НГО. В найближчий час орбіти ГГО перших запусків почнуть повертатися в площину екватора, що може становити загрозу для активних ГГО. Отже, постає проблема дослідження не тільки ризику зіткнення на геостационарній орбіті, але й зміни цього ризику з часом. Використовуємо прямий метод [2]. Обчислюємо положення всіх НГО в певні моменти часу з достатньо малим кроком ($\Delta t = 0.01$ доби) на деякому часовому інтервалі (2 роки). За цими миттєвими розподілами НГО шукаємо небезпечні зближення супутників. Під небезпечним зближенням розуміємо наближення двох НГО один до одного на відстань, що не перевищує 100 км. Параметри зближень розраховуються відповідною програмою і переносяться у спеціальний файл (архів). Цими параметрами є момент мінімального зближення НГО один до одного, відстань між НГО на цей момент, міжнародні номери і типи двох супутників, що зближуються, координати супутників (λ, φ, r) і швидкості їхньої зміни. Відстані між об'єктами у момент зближення можуть використовуватися лише в ймовірнісно-статистичних оцінках, бо похибки визначення орбіт перевищують відстані НГО при небезпечних зближеннях.

Для визначення параметрів відносного руху НГО при небезпечних зближеннях використовуємо ру-

хому прямокутну систему координат, яку назвемо місцевою. Початок цієї системи координат O збігається з положенням одного з двох супутників, що зближуються, наприклад, з першим. Вісь z направлена вздовж геоцентричного радіуса-вектора r першого ГГО від центра Землі, вісь x — перпендикулярна до z , на захід, вісь y — перпендикулярна до координатної площини xOz , направлена в сторону північного полюса Землі. Така система координат зв'язана з координатами λ, φ і r наближеними формулами $x = (\lambda - \lambda_1)r, y = (\varphi - \varphi_1)r, z = r - r_1$, де $\varphi_1, \lambda_1, r_1$ — географічні координати підсупутникової точки і модуль радіуса-вектора першого супутника.

Основним параметром руху при небезпечному зближенні є вектор відносної швидкості $\Delta v = v_2 - v_1$. Будемо розглядати два скалярних параметри: відносну швидкість Δv і кут нахилу між двома прямими, які збігаються з віссю x і з напрямком швидкості Δv . Позначимо цей кут через ψ . Він визначається за формулою $\psi = \text{arctg} [(\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 / \Delta x]^2$, де $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ — координати другого НГО в місцевій системі координат. Очевидно, $0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ$.

Розподіли величин відносних швидкостей Δv (рис. 4) і кутів ψ будувались за даними архіву небезпечних зближень за 1990 і 1997 роки. Величини відносних швидкостей при небезпечних зближеннях знаходяться, в основному, в межах від нуля до 300 м/с. Максимум знаходиться в області 20—100 м/с.

Напрямки НГО, що зближуються, близькі до паралельних: кути ψ між прямими векторів швидкостей двох НГО у переважній більшості за величиною не перевищують 20° . Кути ψ зумовлені значною мірою нахилом орбіти.

Ймовірність зіткнення некерованих ГГО. Розподіл $P(r)$ мінімальних відстаней при небезпечних збли-

женнях НГО, знайдений за даними архіву небезпечних зближень за формулою $P(r) = m/(n\Delta r)$, де Δr — інтервал групування, m — кількість небезпечних зближень двох супутників, відстань між якими знаходиться в даному інтервалі Δr , n — кількість всіх зближень, тобто таких положень двох НГО, мінімальна відстань між якими не перевищує 100 км. Архів містив параметри 5753 зближень (за 2 роки).

За методом найменших квадратів знайшли поліном — наближену функцію густини розподілу відстаней між НГО при небезпечних зближеннях:

$$P(r) = 2.30923 \cdot 10^{-4}r - 4.099228 \cdot 10^{-7}r^2. \quad (2)$$

Середнє значення розмірів НГО за даними каталога 1996 р. становило $r = 8.15$ м. Середнє квадратичне відхилення $\sigma = 8.30$ м. В розрахунках будемо приймати, що середній розмір НГО — 8 м. Ймовірність зіткнення P_3 каталогізованих НГО при небезпечному зближенні обчислюється як інтеграл від функції густини в межах від 0 до 8 м:

$$P_3 = \int_0^{0.008} P(r) dr = 7.5 \cdot 10^{-9}.$$

Під зіткненням розуміємо зближення двох ГО до відстані між їхніми центрами, не більшої за 8 м.

Ймовірність зіткнення НГО за рік визначалася ймовірністю зіткнення в окремому небезпечному зближенні і кількістю небезпечних зближень протягом року. Ймовірність зіткнення за рік зросла з $2 \cdot 10^5$ в 1990 році до $2.5 \cdot 10^5$ в 1997 році. Таке зростання зумовлене збільшенням кількості НГО.

Участь НГО в зближенні мало залежить від типу супутника. За даними архіву небезпечних зближень найчастіше (з частотою 0.87) зближуються супутники різних типів, і лише 0.13 від всіх випадків — це супутники однакового типу.

Ризик зіткнення некерованих об'єктів з активними ГО. Після закінчення ресурсу активного ГО його виводять із зони активних ГО на геосинхронну орбіту, де він рухається як НГО. Тому ризик зіткнення НГО з активними ГО значно менший, ніж ризик зіткнення двох НГО. Протягом року відбувається близько 90 небезпечних зближень активних ГО з НГО, що складає лише 3 % всіх небезпечних зближень НГО.

Густину розподілу відстані між двома ГО при небезпечних зближеннях НГО з активним, знайдено методом найменших квадратів за точками $P(r) = m/(n\Delta r)$, де інтервал групування $\Delta r = 5$ км, m — кількість небезпечних зближень НГО з активними ГО, відстань між якими знаходиться в даному інтервалі Δr , n — кількість всіх таких зближень,

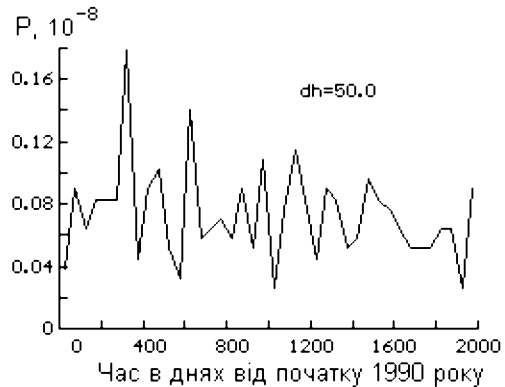


Рис. 5. Зміна ймовірності зіткнення активних ГО з некерованими протягом доби в інтервалі 5.5 років

тобто таких положень двох ГО (НГО і активного), мінімальна відстань між якими не перевищує 100 км. Функція виражається поліномом

$$P'(r) = 1.01003 \cdot 10^{-4}r + 15.858612 \cdot 10^{-7}r^2. \quad (3)$$

Функції густини (2) і (3) відрізняються так, що при небезпечному зближенні ймовірність зіткнення (тобто інтеграл в межах від 0 до 8 м) двох НГО є значно більшою, ніж ймовірність зіткнення активного ГО з НГО. Справді, ймовірність зіткнення активного ГО з некерованим становить

$$P'_3 = \int_0^{0.008} P'(r) dr = 3.2 \cdot 10^{-9},$$

що в 2.34 рази менше від ймовірності P_3 . Враховуючи також частоту небезпечних зближень НГО і зближень НГО з активними ГО, одержуємо, що ймовірність зіткнення активного ГО на геостационарній орбіті в 75 разів менша від ймовірності зіткнення двох НГО. На рис. 5 приведено криву зміни ймовірності зіткнення протягом доби НГО з активним ГО на часовому проміжку біля 5.5 років. Ймовірність обчислювалась як середнє значення на інтервалі 50 діб. Зміна ймовірності відбувається дуже нерівномірно. Найбільший максимум спостерігався на 275-й день. Далі, спадаючи, максимум повторювався ще 3 рази з періодом 330 діб.

Протягом 1990—1995 рр. всього 35 НГО наближались до активних на небезпечну відстань. Майже всі ці НГО є дрейфуючими. Найнебезпечнішим із НГО є супутник 78113D (d1), який наближався до активних ГО 121 раз. Супутник 67066G (d3) наближався 45 разів, 86007A (d1) та 87109A (d1) — по 27, 75011F (d1) — 25, 77034C (d1) — 23, 70055A (d3) та 79098C (d1) — по 19 разів.

1. Багров А. В., Ерпылев Н. П., Микуша А. М. и др. Экспериментальная геодинамика: наблюдения геостационарных ИСЗ // Науч. информ.—1991.—Вып. 69.—С. 35—51.
2. Хуторовский З. Н., Каменский С. Ю., Бойков В. Ф., Смелов В. Л. Риск столкновения космических объектов на низких высотах // Столкновения в космическом пространстве (космический мусор). — М.: Космосинформ, 1995.— С. 19—90.

HAZARD OF COLLISIONS OF ARTIFICIAL SPACE OBJECTS IN GEOSYNCHRONOUS ORBITS

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

We present the spatial distribution of unguided objects in the zone of geosynchronous satellites, distribution of orbital elements for these objects, and distribution of parameters of relative motion at their rendezvous with controlled geostationary satellites. The probabilities of collision between unguided objects as well as of their collision with controlled geostationary satellites are studied.

УДК 528.28:629.783

© Н. І. Каблак, В. У. Клімик, І. В. Швалагін, У. І. Каблак

Лабораторія космічних досліджень Ужгородського національного університету, Ужгород

**МОНІТОРИНГ ВИПАДАЮЧОЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ
ЗА ДОПОМОГОЮ GPS ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОГОДИ**

Волога зенітна затримка, яка одержується із аналізу даних GPS-спостережень, може бути перетворена у значення випадаючої водяної пари, що дає вагомий внесок у моделювання клімату та оперативне передбачення погоди. При цьому повинно бути відоме значення середньої температури в атмосфері. Приведено оцінку значень випадаючої водяної пари в пункті Київ.

Вступ. Для точного прогнозу погоди необхідна інформація виключної якості з високим просторово-часовим розділенням. Через різні обмеження традиційні спостереження у радіодіапазоні або в системі метеорологічних супутників часто не враховують такий важливий параметр, як тропосферна водяна пара. Використання GPS дозволяє застосовувати недорогу технологію для регіонального і глобального моніторингу вмісту водяної пари. Параметр тропосферної затримки $\Delta\rho$ електромагнітної хвилі є основною величиною при побудові та аналізі метеорологічної моделі для прогнозування погоди. Тропосферна затримка складається з двох компонентів: зенітної гідростатистичної затримки $\Delta\rho_d$, яка залежить від стану сухої складової атмосфери, і зенітної вологої затримки $\Delta\rho_w$, яка залежить від вологості повітря.

Похибки врахування тропосферної рефракції в GPS-вимірюваннях впливають перш за все на загальний масштаб геодезичних вимірювань і на точність визначення висоти пунктів спостережень, а також на горизонтальні координати даних пунктів.

Вплив нейтральної атмосфери на GPS-вимірювання. Вплив нейтральної тропосфери на розповсюдження GPS визначається поправкою у відстань [1, 2, 4, 5]:

$$\Delta\rho = 10^{-6} \int N ds + (L - G), \quad (1)$$

де $N = N(S)$ — індекс рефракції вздовж кривої розповсюдження сигналу, L — шлях розповсюдження сигналу, G — геометрична відстань. Перша складова поправки (1) — це поправка за рахунок зміни швидкості розповсюдження сигналу, друга — геометрична поправка. Індекс рефракції [2, 4] визначається формулою

$$N = K_1 \left(\frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + \left[K_2 \left(\frac{e}{T} \right) + K_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) \right] Z_w^{-1},$$

де P_d , мбар — тиск сухого повітря; e , мбар — парціальний тиск водяної пари; T , К — температура повітря; Z_d^{-1} , Z_w^{-1} — фактори стиску сухого і вологого повітря або величини, обернені коефіцієнтам стиску сухого повітря і водяної пари; K_1 , К/мбар — коефіцієнт, що характеризує поляризованість молекул сухого повітря; K_2 , К/мбар — коефіцієнт, що враховує поляризацію молекул води; K_3 , 10^5 К²/мбар — коефіцієнт, що відображає вплив зміни електричної орієнтації полярних молекул води.

Із рівняння Менделєєва — Клапейрона одержуємо

$$N = K_1 R_d \rho + \left[K_2' \left(\frac{e}{T} \right) + K_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) \right] Z_w^{-1}, \quad (2)$$

де

$$K_2' = K_2 - K_1 \left(\frac{R_d}{R_w} \right) = K_2 - K_1 \frac{M_w}{M_d},$$