

# ПРОГНОЗУВАННЯ РУХУ ГЕОСИНХРОННИХ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ ОТОТОЖНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЇХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

**І.І.Мотрунич, В.У.Клімик, К.А.Кудак,  
Г.М.Мацо, О.Є.Стародубцева**

Ужгородський національний університет, Лабораторія космічних досліджень,  
вул.Далека, 2а, 88000, Ужгород  
e-mail: [space@univ.uzhgorod.ua](mailto:space@univ.uzhgorod.ua)

Описана методика ототожнення некерованих геосинхронних об'єктів за даними позиційних спостережень на основі використання аналітичної теорії їх руху і результати її застосування в Ужгороді для обчислення схилень  $\delta$  та годинних кутів  $t$ . Досліджуються загальні закономірності зміни  $\delta$  і  $t$  некерованих і активних супутників.

## 1. Ототожнення некерованих геосинхронних об'єктів (ГО)

Спостереження ГО в Лабораторії космічних досліджень УжНУ ведуться з 1977 року [1]. З 1995 року проводилось ототожнення ГО (присвоєння номера згідно з міжнародними каталогами), одержаних на негативах в Ужгороді, а також обчислення елементів орбіт і ототожнення результатів спостережень, що проводились в Києві (ГАО НАНУ). При цьому використовувалися програми і методики, розроблені в ЛКД УжНУ [2]. Результати спостережень і ототожнення ГО в двох пунктах за 1995-2000 рр. були опубліковані [3-4] або подані в інтернет як каталоги GOSKU (Geosynchronous Objects Catalogue: Kiev – Uzhgorod) [5-7].

Ототожнення ГО проводилося шляхом порівняння його довготи  $\lambda$  і дрейфу  $\dot{\lambda}$ , а також елементів орбіт  $i$ ,  $\Omega$ , визначених за результатами спостережень, з відповідними каталожними значеннями для цього об'єкта. Вдавалось ототожнити до 80% всіх супутників, якщо епоха каталога співпадала з епохою спостережень. В протилежному випадку добре ототожнювалися лише активні супутники, але процент ототожнення був досить високий із-за малої кількості некерованих об'єктів на геосинхронній орбіті.

Труднощі ототожнення некерованих ГО зумовлені тим, що вони спостерігаються протягом невеликого проміжку часу (найчастіше протягом лише однієї ночі) із-за великого дрейфу, і похибка обчислення елементів орбіт та дрейфу за такими спостереженнями є великою. Точними залишаються лише координати  $\alpha_0$  і  $\delta_0$ , визначені за результатами спостережень, тому лише їх слід використовувати в основному критерії при ототожненні. Цим критерієм може бути умова, що знайдені з спостережень координати  $\alpha_0$  і  $\delta_0$  супутника в момент часу  $t$  мало відрізняються від каталожних координат  $\alpha_c$  і  $\delta_c$  на цей час найближчого до точки  $(\alpha_0, \delta_0)$  супутника, наприклад:  $|\Delta\alpha| < 1^\circ$ ,  $|\Delta\delta| < 0.5^\circ$ . Додатковою умовою може бути  $|\Delta\dot{\lambda}| < 1^\circ$  за добу, а також  $|\Delta i| < 1^\circ$ , якщо обчислювався з спостережень нахил орбіти.

На першому кроці було виділено некеровані об'єкти з масиву всіх спостережень. Для цього використовувалася умова, що дрейф некерованих ГО повинен задовільняти нерівність  $|\dot{\lambda}| > 0.02^\circ$  за добу. В програмі обчислення елементів орбіт [8] дрейф обчислювався як кутова швидкість руху радіус-вектора підсупутникової точки в земній системі координат. Так як відстань до ГО велика порівняно з радіусом Землі, то для оцінки

величини дрейфу можна використовувати дуже просту наближену формулу [9]:

$$\dot{\lambda} \approx \frac{\alpha_2 - \alpha_1 - \omega_o \cdot (t_2 - t_1) + m \cdot 24^h}{t_2 - t_1 + n \cdot 24^h}, \quad (1)$$

де  $\alpha_1, \alpha_2$  – знайдені з спостережень прямі сходження ГО на моменти  $t_1, t_2$ ; цілі числа  $m, n$  враховують цикли (оберти) зміни  $\alpha$  і  $t$ ;  $\omega_o$  – швидкість обертання Землі в зоряній шкалі часу ( $\omega_o = 1,0027379$  обертів за добу). Формула (1) визначає дрейф супутника з точністю  $0,2^\circ-0,3^\circ$  за добу.

На основі аналітичної теорії руху ГО [10], що враховує збурення Місяця і Сонця, а також неоднорідність гравітаційного поля Землі, за даними каталога [11] обчислювались елементи орбіт некерованих супутників на момент  $t$  і за ними визначалися  $\alpha_c, \delta_c, \lambda_c, \dot{\lambda}_c, i_c$ . Порівнюючи обчислені величини з одержаними із спостережень  $\alpha_o, \delta_o, \lambda_o, \dot{\lambda}_o, i_o$ , за програмою знаходились супутники, що задовільняють основний критерій і додаткові умови.

За пропозованим методом проведено ототожнення некерованих ГО, що спостерігались в 1989 – 2000 рр. в Ужгороді. Наводимо кількість ототожнених супутників по типах:

тип супутника	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
кількість спост.	19	5	15	36	82	12.

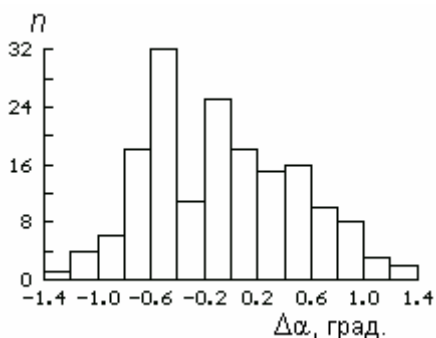


Рис.1. Гістограма розподілу похибок  $\Delta\alpha$  при ототожненні некерованих ГО.

Об'єкти спостерігались на проміжку довгот від  $34^\circ\text{W}$  до  $33^\circ\text{E}$ , що приблизно відповідає інтервалу годинних кутів  $-12^\circ < t < 62^\circ$ .

Розподіл похибок  $\Delta\alpha = \alpha_o - \alpha_c$  при ототожненні спостережень ГО в Ужгороді (рис.1) близький до нормального. Допускались похибки  $|\Delta\alpha| > 1^\circ$  в окремих випадках, коли супутники типу  $l_3$  знаходились поблизу нестійкої точки або коли дрейф супутника типу  $d$  дуже великий, але при обов'язковій умові, що  $|\Delta\delta|$  мале ( $\Delta\delta = \delta_o - \delta_c$ ). Середні значення похибок:

$$\Delta\alpha = -0,064^\circ \pm 0,556^\circ;$$

$$\Delta\delta = 0,030^\circ \pm 0,328^\circ.$$

За результатами ототожнення значення дрейфів супутників знаходились в межах від  $-20^\circ$  до  $12^\circ$  за добу (рис.2).

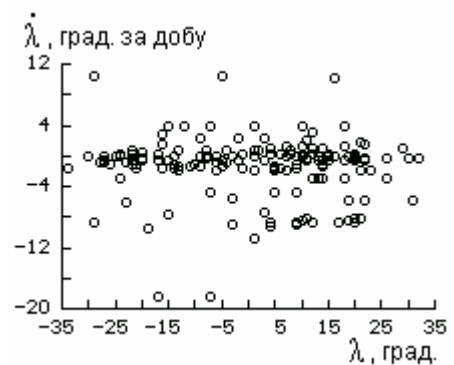


Рис.2. Дрейфи некерованих ГО, що спостерігались в Ужгороді протягом 1989-2000рр.

## 2. Прогнозування положень некерованих ГО

Розроблену методику ототожнення некерованих ГО можна використовувати для прогнозування схилень  $\delta$  та годинних кутів  $t$ , необхідних для майбутніх спостережень. На рис.3, 4 приведені графічно координати  $\delta$  і  $t$  супутника 67026A на 1 – 5 вересня 2003 року для Ужгорода. Суцільними лініями показано ефемериди на  $0^h$  місцевого часу  $\pm 6^h$ . Зміна схилення  $\delta$  має короткоперіодичну складову (синусоїду) з періодом 1 зоряна доба, що зумовлено нахилом орбіти. Амплітуда цієї гармоніки приблизно рівна нахилу орбіти в даний час.

Для точного визначення параметрів зміни  $\delta$  використали виборку з 20 супутників. Розрахунки показали, що похибка представлення кривої на рис.3 гармонікою становить  $\sigma_\delta = 0,05^\circ \pm 0,02^\circ$ ;

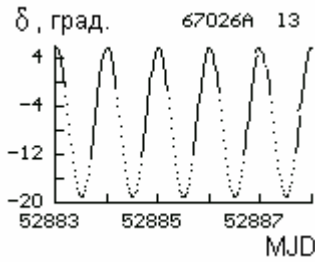


Рис.3. Зміна схилення супутника 67026A в Ужгороді протягом 5 днів (1–5.09.2003).

період зміни схилення  $T_\delta = 1,000 \pm 0,001$  зоряної доби. Вісь синусоїди  $\delta_0 = -6,5^\circ \pm 0,4^\circ$ . Амплітуда зміни схилення досить добре корелює з нахилом орбіти, коефіцієнт регресії  $\rho = 0,96$ ; лінія регресії:

$$A_\delta^\circ = 1,025 i^\circ - 0,178^\circ. \quad (2)$$

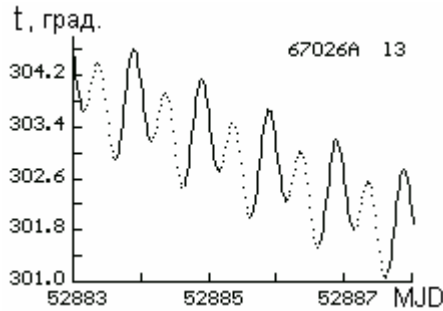


Рис.4. Зміна годинного кута супутника 67026A в Ужгороді протягом 5 днів.

Лінія регресії (2) приведена на рис. 5. Коефіцієнти цього рівняння підтверджують думку про те, що добова амплітуда зміни схилення і нахил орбіти близькі за величиною. Велике середнє квадратичне відхилення ( $\sigma = 0,80^\circ$ ) точок від кривої (2) зумовлене різним схиленням геостационарних супутників в даному пункті на різних годинних кутах.

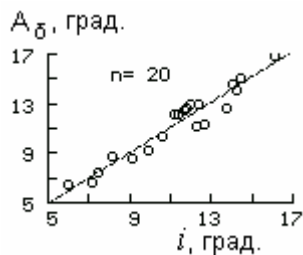


Рис.5. Кореляційна залежність амплітуди зміни схилення некерованих ГО від нахилу орбіти в Ужгороді.

Зміни нахилу орбіти  $i$  супутника 83065A є майже прямою на протязі двох років (рис.6). Криві, позначені  $\delta$ , є сукупністю точок максимуму і мінімуму кривої зміни схилення  $\delta$ . Відстань між точками двох кривих  $\delta$ , що розміщені на одній вертикальній прямій, є подвоєною амплітудою добової зміни нахилу орбіти. Сукупність ординат осей гармонік утворює на рис.6 криву  $O$ . Зміна цих ординат зумовлена зміною схилення ідеальної геостационарної орбіти при зміні годинного кута в даному пункті.

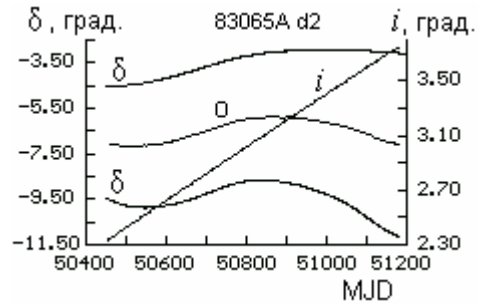


Рис.6. Екстремальні точки зміни схилення  $\delta$  ГО 83065A в Ужгороді і зміна його нахилу орбіти  $i$  протягом двох років (1997-1998);  $O$  – ординати осей синусоїд.

Зміна годинного кута  $t$  від часу (рис.4) містить лінійну і періодичну складову. Лінійна складова для супутника 67026A задається рівнянням:

$$t = -0,45^\circ \cdot \text{MJD} + 24370,98^\circ.$$

Середнє квадратичне відхилення точок від лінійної складової (зумовлене періодичною складовою):  $\sigma = 0,52^\circ$ . З точністю до  $0,01^\circ$  величина коефіцієнта біля MJD лінійної складової зміни  $t$  співпадає з середнім дрейфом, тобто з коефіцієнтом лінійної складової зміни довготи  $\lambda$ , і має протилежний знак. Географічна довгота  $\lambda$  на проміжку до 1 місяця змінюється лінійно з точністю  $0,002^\circ$ , тому звязок між лінійною складовою зміни  $t$  і довготою  $\lambda$  наближено можна виразити лінійною залежністю  $t$  від MJD:  $t = -\lambda + \bar{\lambda}_{Pu}$ , де  $t$  і  $\lambda$  – лінійні функції від MJD. Величина  $\bar{\lambda}_{Pu}$  близька до  $\lambda_{Pu}$  – східної довготи пункту спостережень (різниця може становити  $2^\circ$ ).

Для дослідження періодичної складової зміни  $t$  (рис.4) відніmemo лінійну складову. Одержана при цьому періодична складова для супутника 67026A в інтервалі 5 діб приведена на рис.7. Вона є сумою двох гармонік. Перша, основна, має період 0,5 доби, друга – 1 зоряну добу (з похибкою 0,005 доби). При точному визначенні лінійної складової осі синусоїд мають нульові ординати. Отже, на невеликих проміжках часу (до 1 місяця) зміну годинного кута  $t$  некерованого ГО з великою точністю (середнє квадратичне відхилення  $\approx 0,01^\circ$ ) можна виразити за формулою:

$$t = -\lambda + \bar{\lambda}_{Pu} + A_1 \cdot \sin(4\pi \cdot MJD + \varphi_1) + A_2 \cdot \sin(2\pi \cdot MJD + \varphi_2), \quad (3)$$

де  $\lambda$  – географічна довгота ГО;  $A_1$ ,  $\varphi_1$  – амплітуда і фаза першої гармоніки;  $A_2$ ,  $\varphi_2$  – амплітуда і фаза другої гармоніки. Для супутника 67026A у вересні 2003 року (рис.7):  $A_1 = 0.656^\circ$ ,  $A_2 = 0.344^\circ$ .

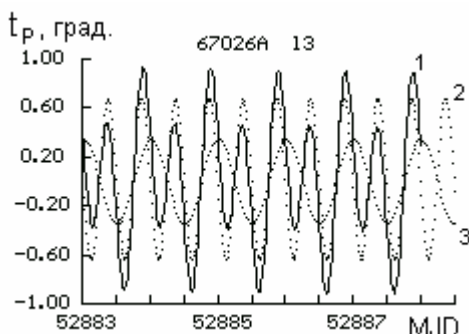


Рис.7. Періодична складова зміни  $t$  ГО 67026A в Ужгороді протягом 5 днів (1); перша і друга гармоніки (2, 3).

Амплітуда основної гармоніки (що має період 0,5 доби) некерованих ГО залежить від нахилу орбіти  $i$ . Обчислені значення амплітуд і нахилів орбіт окремих, довільно вибраних 20 супутників. Лінія регресії, побудована за цими точками,

$$A_i = 0.072 \cdot i^\circ - 0.2488965^\circ, \quad (4)$$

має коефіцієнт кореляції  $\rho = 0.986$  та середнє квадратичне відхилення  $\sigma = 0.036^\circ$ . При малих нахилах орбіти основна гармоніка може бути відсутня.

Амплітуда другої гармоніки (період 1 зоряна доба) залежить лише від ексцен-

триситету орбіти ГО. Здебільшого вона не перевищує максимальне значення амплітуди першої гармоніки, інколи взагалі відсутня. Наводимо середні значення періодів двох гармонік і середні квадратичні відхилення, знайдені за виборкою з декількох супутників:

$$P_1 = 0,500 \pm 0,003 \text{ доби}; \\ P_2 = 1,000 \pm 0,003 \text{ зор. доби}.$$

### 3. Прогноз руху активних ГО

Особливістю керованих супутників є малі значення нахилу орбіти і дрейфу. Елементи орбіт будемо вважати незмінними, а дрейф рівний нулю. Така модель активних супутників мало відрізняється від реальних керованих ГО. Вона є частинним випадком некерованих ГО, і деякі висновки можна отримати з досліджень пасивних ГО. З рис.3 і формули (2) одержуємо, що схилення може змінюватися лише синусоїдально з періодом 1 зоряна доба. Так як в (3)  $\lambda$  не змінюється, то відсутня лінійна складова годинного кута. З (4) впливає, що амплітуда основної гармоніки зміни  $t$  ( $P = 0,5^d$ ) близька до нуля, тобто ця гармоніка практично відсутня. (Це спостерігається і в активних супутників з малими нахилами орбіти.) В (3) залишається лише друга, добова, гармоніка, але в неї буде ненульова ордината осі:  $t_0 \approx \bar{\lambda}_{Pu} - \lambda$ .

Як приклад, розглянемо зміну схилення активного ГО 91003A протягом 5 днів у вересні 2003 року (рис.8). Крива зміни є гармонікою. Період, амплітуда, вісь гармоніки відповідно рівні:

$$P = 1,000 \text{ зор. доба}, \\ A = 0,051^\circ, \quad \delta_0 = -7,145^\circ.$$

Зміна годинного кута цього ж супутника (рис.9) також є гармонікою з параметрами:

$$P = 1.000 \text{ зор. д.}, \quad A = 0.040^\circ, \quad t_0 = 10.34^\circ.$$

Середні квадратичні відхилення значень  $\delta$  і  $t$  від відповідних гармонік однакові і рівні  $\sigma = 0,0003^\circ$ .

Середні значення  $\delta_0$  (ординати осей гармонік) залежать від  $t_0$ . Для оцінки цієї залежності за виборкою з 20 керованих ГО

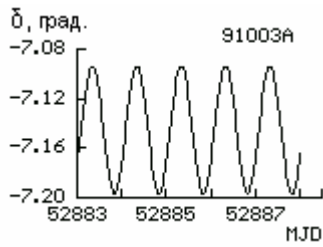


Рис.8. Зміна  $\delta$  керованого ГО 91003А протягом 5 діб.

було знайдено гармоніки (зокрема для ГО 91003А: рис.8, 9) і для кожного супутника – точку ( $t_0, \delta_0$ ). По цих точках (рис.10) знайдено кореляційну залежність  $\delta_0$  від  $t_0$ :

$$\delta_0 = -7.14928 - 1.786 \cdot 10^{-5} t_0 + 9.444 \cdot 10^{-5} t_0^2.$$

Середнє квадратичне відхилення точок від кривої  $\Delta\delta = 0.007^\circ$ .

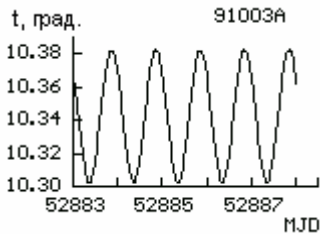


Рис.9. Зміна  $t$  керованого ГО 91003А протягом 5 діб.

З точністю до  $0,000005^d$  середній період зміни схилення  $\delta$  (знайдений за виборкою) співпадає з періодом обертання Землі відносно своєї осі в зоряній системі координат. Такий же період зміни  $t$ , але визначається він з дещо більшою похибкою.

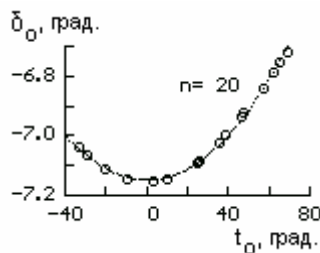


Рис.10. Залежність середніх значень  $\delta_0$  керованих ГО від  $t_0$ .

### Література:

1. Єпішев В.П., Мотрунич І.І. і ін. Каталог положень геостационарних супутників Землі за даними спостережень в Ужгороді. – Ужгород: УжНУ, 1996. – 250с.

Нахил орбіти ГО впливає на амплітуду зміни  $\delta$  і на середнє квадратичне відхилення  $\sigma_\delta$  точок від гармоніки зміни  $\delta$  (рис.8). Залежність амплітуди  $A_\delta$  від  $i$  добре можна виразити прямою регресії:

$$A_\delta = 1.0703360 \cdot i + 0.0018444,$$

коефіцієнт кореляції  $\rho = 0.99994$ , сер. кв. відх.  $\sigma = 0.0096^\circ$ . Амплітуда  $A_\delta$  завжди трохи більша від нахилу  $i$ .

Похибка представлення зміни  $\delta$  і  $t$  гармоніками збільшується при збільшенні нахилу орбіти за слідуною схемою:

нахил $i$ :	$0^\circ - 0,4^\circ$	$1^\circ$	$3^\circ$
$\Delta\delta$ :	$0,0003^\circ$	$0,0007^\circ$	$0,0035^\circ$
$\Delta t$ :	$0,0004^\circ$	$0,0030^\circ$	$0,0308^\circ$ .

Швидко порівняно з  $\delta$  зростання похибки  $t$  зумовлене появою вже при  $i = 1^\circ$  ще однієї гармоніки з періодом 0,5 доби. Похибка представлення  $t$  сумою двох гармонік навіть при  $i = 3^\circ$  становить  $0,0003^\circ$ .

Амплітуда зміни годинного кута  $t$  (рис.9) залежить від ексцентриситету орбіти супутника і зумовлена ним. Прямая регресії

$$A_t = 127.68385^\circ \cdot e - 0.00059^\circ$$

має високий коефіцієнт кореляції:  $\rho = 0.9995$ , сер.кв.відх.  $\sigma = 0.00076^\circ$ .

Середнє значення  $t_0$  (ордината осі синусоїди, рис.9) лінійно залежить від географічної довготи підсупутникової точки  $\lambda$ . Лінія регресії

$$t_0 = \bar{\lambda}_{Pu} - 1.0951 \cdot \lambda \quad (5)$$

має коефіцієнт кореляції  $\rho = -0.99997$ ,  $\sigma = 0.28^\circ$ . В (5) коефіцієнт  $\bar{\lambda}_{Pu} = 24.3496^\circ$  близький до географічної довготи пункту спостережень, але не співпадає з ним (географічна довгота Ужгорода  $\lambda_{Pu} = 22.3075^\circ$ ).

2. 60 років Головної астрономічній обсерваторії НАН України / За ред. Я.С.Яцківа. – Київ: Академперіодика, 2004. – С.185-186.

3. Демчик М.І., Кириченко А.Г. і ін. // Додаток до журналу Космічна наука і технологія. – Т.2, N 1, – Київ, 1996. – 52с
4. Kizyun L.M., Kirichenko A.G. et al. // Додаток до журналу Космічна наука і технологія. – Т.4, N 1, – Київ, 1998. – 52с.
5. Кириченко А.Г., Кизюн Л.М. і ін. // Кинематика и физика небесных тел. – Т.16, №4, – К.: ГАО НАНУ, 2000. – С. 381-384.
6. Кириченко А.Г., Кизюн Л.М. і ін. // Кинематика и физика небесных тел. – Т.17, №1, – К.: ГАО НАНУ, 2001. – С.92-96.
7. Кириченко А.Г., Кизюн Л.М. і ін. // Кинематика и физика небесных тел. – Т.18, №1, – К.: ГАО НАНУ, 2002. – С.90-96.
8. Кириченко А.Г., Климик В.У. // Набл. иск. небес. тел. – №88, – М.,1994. – С.36-38.
9. Кизюн Л.М., Климик В.У. // Кинематика и физика небесных тел. – Т.20, №2, – К.: ГАО НАНУ, 2004. – С.189-192.
10. Багров А.В., Ерпылев Н.П. и др. // Научные информации. – Вып.69, – Москва, ИА АН СССР, 1991. – С.35–51.
11. Сочилина А.С., Киладзе Р.И., Григорьев К.В., Вершков А.Н. Каталог орбит геостационарных спутников. – С.-Петербург: ИТА РАН, 1996. –104с.

## **FORECASTING OF MOTION OF GEOSYNCHRONOUS OBJECTS FOR IDENTIFICATION OF OUTCOMES OF THEIR OBSERVATIONS**

**I.I.Motrunch, V.U.Klimyk, K.A.Kudak,  
G.M.Matso, O.E.Starodubtseva**

Uzhgorod National University, Laboratory of space researches,  
Daleka str. 2a, 88000, Uzhgorod, Ukraine.  
E-mail: space@univ.uzhgorod.ua

The technique of identification of unguided geosynchronous objects on the basis of usage of the analytical theory of their motion and outcomes of item observations is described, and also outcomes of its application in Uzhgorod for calculation of coordinates  $\delta$  and  $t$ . Some common legitimacies of change  $\delta$  and  $t$  of passive and controlled satellites are researched.