

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Троянський Володимир Володимирович**

УДК 523.4

**ДИНАМІКА ОБРАНИХ ПОДВІЙНИХ І КРАТНИХ  
МАЛИХ ТІЛ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ**

01.03.01 – Астрометрія і небесна механіка

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеському національному університеті імені І.І. Мечникова Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат фізико-математичних наук  
**Базей Олександр Анатолійович,**  
Одеський національний університет імені І.І. Мечникова  
Міністерства освіти і науки України,  
доцент кафедри теоретичної фізики та астрономії.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Шульга Олександр Васильович,**  
Науково-дослідний інститут  
«Миколаївська астрономічна обсерваторія»  
Міністерства освіти і науки України, директор;

кандидат фізико-математичних наук  
**Терещенко Андрій Олександрович,**  
Національний авіаційний університет  
Міністерства освіти і науки України,  
доцент кафедри аерокосмічної геодезії.

Захист відбудеться 27 червня 2017 року о 15 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.062.13 Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, пр. Космонавта Комарова, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, пр. Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розісланий 26 травня 2017 року.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради К 26.062.13  
кандидат фізико-математичних наук, доцент



Чубко Л.С.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** З початку XXI століття безупинне вдосконалення засобів спостереження і збільшення числа космічних місій до небесних тіл суттєво розширили наші представлення про Сонячну систему. Рішенням XXVI Генеральної асамблеї МАС (Міжнародного Астрономічного Союзу) в 2006 році була введена нова класифікація небесних тіл. Сьогодні по орбітам навколо Сонця рухаються великі планети, карликові планети, астероїди або малі планети, комети, метеороїди, пил і газ.

Раніше передбачалося, що тіла невеликих мас не можуть утримувати супутники тривалий час. Несподіванкою стало відкриття подвійних [33], а згодом і потрійних [27] малих планет. Деякі подвійні системи мають дуже короткий орбітальний період і швидке осьове обертання [24]. Більш того, в 2014 році був відкритий перший астероїд (10199) Chariklo, що має систему кілець [25]. Значний інтерес представляють малі тіла, які зближуються з орбітою Землі. До теперішнього часу відомо біля півсотні подвійних і кратних астероїдів, що зближуються з Землею [34].

Перераховані факти повинні отримати теоретичне пояснення. Необхідно зрозуміти процеси формування і динамічної еволюції подвійних астероїдів протягом 4,5 млрд. років в оточенні великих планет. Які чинники ведуть до їх розпаду або, навпаки, до випадання і утворення єдиного астероїда? Чи можуть кратні системи малих тіл утворюватися в даний час?

Дисертація націлена на отримання нових теоретичних результатів, використання яких допоможе відповісти на поставлені запитання.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основна частина роботи виконана у Науково-дослідному інституті "Астрономічна обсерваторія" та кафедрі астрономії ОНУ імені І.І. Мечникова в межах планових держбюджетних науково-дослідних тем №484 "Дослідження руху та фрагментації метеорних і штучних тіл в земній атмосфері та міжпланетному просторі" (2013-2014, номер держ. реєстрації 0112U001749, ОК 0215U004226, ІК 0715U003271) та №527 "Високоточні вимірювання та моделювання руху штучних і природних космічних тіл у навколосемному просторі" (2015-2017, номер держ. реєстрації 0115U003201).

**Мета, задачі та методи дослідження.** Метою даної дисертаційної роботи є:

1. Вивчення динаміки супутників астероїдів.
2. Реалізація методик визначення коефіцієнтів розкладання гравітаційного поля компонентів астероїдних систем.
3. Дослідження вкладу періодичних і вікових збурень в еволюцію орбіт астероїдних систем.

**Об'єкт дослідження:** подвійні і кратні малі тіла Сонячної системи.

**Предмет дослідження:** еволюція орбіт супутників подвійних і кратних малих тіл Сонячної системи.

**Методи дослідження:** Чисельне моделювання та інтегрування рівнянь руху. Для моделювання використовувався мова програмування *Object Pascal* в середовищі розробки *Embarcadero Delphi*. Власні спостереження на телескопі OMT-800.

**Наукова новизна одержаних результатів.** За допомогою нової методики обробки оптичних спостережень підвищена проникна здатність телескопа OMT-800 з  $19^m$  до  $21^m$ ;

Уточнено орбіти нових астероїдів;

Вперше розраховані резонанси в астероїдних системах;

Вперше обчислені: маса, велика піввісь орбіти, орбітальний період, резонансні співвідношення, передбачуваного супутника-пастуха астероїда (10199) Chariklo;

Вперше обчислено 5 коефіцієнтів розкладання потенціалу гравітаційного поля обраних компонентів астероїдних систем, що розглядалися;

Побудована модель руху супутників малих тіл Сонячної системи, що враховує асиметрію компонентів моделі і тиск сонячного світла на супутники астероїдів;

Детально розглянуто 9 систем малих тіл: (45) Eugenia, (87) Sylvia, (90) Antiope, (66391) 1999 KW4, (134340) Pluto, (136108) Naumea, (136617) 1994 CC, (153591) 2001 SN263, (385446) Manwe.

**Практичне значення отриманих результатів.** Запропонована модель і методи вже використовуються в плануванні широкого спектра завдань спостережень (астрометричних та фотометричних) подвійних і кратних малих тіл Сонячної системи.

**Достовірність і обґрунтованість результатів досліджень.** При використанні чисельного інтегрування рівнянь руху контроль збіжності моделі або так званий контроль кроку інтегрування здійснювався методом прямого-зворотнього інтегрування і подвоєння кроку інтегрування рівнянь руху на інтервалі 100 років з кроком 30 секунд. Отримана величина розбіжності чисельної моделі, побудованої автором, яка не перевищує  $10^{-6} - 10^{-7}$  метра.

Також використовуючи закон збереження енергії, можемо записати наступне: в замкнутій системі  $N$  тіл, сума кінетичної ( $T$ ) та потенційної ( $U$ ) енергій постійна  $T - U = const$  (1), так використовуємо цю умову, як критерій стійкості чисельної моделі. Для зручності використання, запишемо вираз (1) в наступному вигляді:

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_i \left( \left( x'_i - \frac{\sum_{i=1}^N m_i x'_i}{\sum_{i=1}^N m_i} \right)^2 + \left( y'_i - \frac{\sum_{i=1}^N m_i y'_i}{\sum_{i=1}^N m_i} \right)^2 + \left( z'_i - \frac{\sum_{i=1}^N m_i z'_i}{\sum_{i=1}^N m_i} \right)^2 \right) - G \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{m_i m_j}{r_{ij}} = const. \quad (2)$$

**Особистий внесок здобувача.** У роботах, виконаних зі співавторами, особистий внесок здобувача полягає в участі постановки задачі і проведенні чисельних та аналітичних розрахунків.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи доповідалися на наукових семінарах кафедри астрономії ОНУ імені І.І. Мечникова, НДІ "Астрономічна обсерваторія" ОНУ імені І.І. Мечникова і на наступних міжнародних наукових конференціях:

1. International scientific and methodological conference "KOLOS 2013", 5-7 December 2013, The Astronomical Observatory on Kolonica Saddle, Slovakia.
2. XVI Міжнародна наукова конференція "Астрономічна школа молодих вчених", 29-31 травня 2014р., Кіровоградський державний педагогічний університет, Кіровоград, Україна.
3. 14-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radioastronomy and Astrobiology", August 17-24, 2014, Odessa I.I.Mechnikov National University, Odessa, Ukraine.
4. 14-th Ukrainian conference on space research, September 8-12, 2014, Institute of electron physics NASU, Uzhgorod, Ukraine.
5. VI Memorial International conference "CAMMAC-2014", October 29 - November 2, 2014р., Вінницький державний педагогічний університет, Vinnytsia, Ukraine.
6. VII міжнародна наукова конференція "Вибрані питання астрономії та астрофізики", 7-10 жовтня 2014р., Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, Україна.

7. *Third "Gaia Follow-up Network for Solar System Objects" Workshop*, November 24-26, 2014, Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides, Observatoire de Paris, France.
8. *International scientific and methodological conference "KOLOS 2014"*, December 4-6, 2014, The Astronomical Observatory on Kolonica Saddle, Slovakia.
9. *22nd Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*, April 20-25, 2015, Kyiv, Ukraine.
10. *XVII Міжнародна наукова конференція "Астрономічна школа молодих вчених"*, 20-22 травня 2015р., Житомирський державний університет, Житомир, Україна.
11. *5-th Gamow Memorial International Conference dedicated to 111-th anniversary of George Gamow "Astrophysics and Cosmology after Gamow: progress and perspectives" and 15-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radioastronomy and Astrobiology"*, August 16-23, 2015, Odessa I.I.Mechnikov National University, Odessa, Ukraine.
12. *International scientific and methodological conference "KOLOS 2015"*, December 3-5, 2015, The Astronomical Observatory on Kolonica Saddle, Slovakia.
13. *The 4th "Workshop on Binaries in the Solar System"*, June 21-23, 2016, Prague, Czech Republic.
14. *16-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radioastronomy and Astrobiology"*, August 14-20, 2016, Odessa I.I.Mechnikov National University, Odessa, Ukraine.
15. *MAO - 195. "Actual Questions of Ground-based Observational Astronomy"*, September 26-29, 2016, Mykolaiv, Ukraine.
16. *VIII наукова конференція "Вибрані питання астрономії та астрофізики"*, 17-12 жовтня 2016р., Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, Україна.
17. *International scientific and methodological conference "KOLOS 2016"*, December 1-3, 2016, The Astronomical Observatory on Kolonica Saddle, Slovakia.
18. *24nd Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics*, April 24-29, 2017, Kyiv, Ukraine.
19. *XIX Міжнародна наукова конференція "Астрономічна школа молодих вчених"*, 24-25 травня 2017р., Біла Церква, Україна.

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи викладені автором в 8 статтях [1-8], що опубліковані у наукових журналах, які входять

до "Переліку наукових фахових видань" МОН України і в 15 публікаціях [9-23] за результатами доповідей на конференціях, які проходили в Україні та за її межами.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 133 сторінок, дисертація містить 38 малюнків, 11 таблиць, список цитованої літератури включає в себе 66 посилань.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **Вступі** показані актуальність проблеми, мета дослідження і постановка задачі, представлені основні результати дисертації та положення, що виносяться на захист, дана їх наукова новизна і практична цінність. Наводяться обсяг і структура дисертації.

У **Розділі I "Класифікація малих тіл Сонячної системи та їх спостереження"** викладені основні положення сучасного уявлення про групи і родини малих тіл: Вулканоїди, астероїди як зближуються з Землею (Атіри, Атони, Аполлони, Амури), Марс-кроссери, Головний пояс астероїдів, Троянські астероїди, Кентаври, Дамоклоїди, Транснептунові об'єкти.

Наведено визначення малої планети і подвійної або кратної малої планети Сонячної системи. Подвійне або кратне мале тіло – це система з двох або більше гравітаційно пов'язаних малих тіл Сонячної системи, які обертаються по замкнутих орбітах навколо спільного центру мас.

Приведена кількість і перелічені методи відкриття супутників астероїдів. Наведено список досліджуваних об'єктів. Станом на 01.05.2017 відомо 300 подвійних і кратних об'єктів (Таблиця 10): 286 подвійних, 13 потрійних систем і шестикомпонентна система Плутона, в цілому 317 супутників малих тіл і астероїд (10199) Chariklo з системою кілець.

Ці системи включають в себе наступні об'єкти:

- 61 А33 (3 з двома супутниками кожний),
- 22 Марс-кроссери (1 з двома супутниками),
- 132 астероїд Головного поясу (8 з двома супутниками кожний),
- 4 троянські астероїди Юпітера, і
- 81 транснептуновий об'єкт (2 з двома супутниками, 1 з п'ятьма супутниками, не враховуючи 1 з кільцями).

З них чотири транснептунових об'єкта, які в даний час згадуються згідно конвенції IAU [35] як карликові планети,: (134340) Pluto, (136108) Haumea, (136199) Eris і (136472) Makemake.

## Методи виявлення.

Кількість систем з загальним числом супутників в дужках  
(станом на 01.05.2017).

Група	Наземні, оптичні спостере- ження	Космічні, оптичні спостере- ження	Радарні спостер- е-ження	Фото- метричні спостере- ження	<b>Всього</b>
АЗЗ	0 (0)	0 (0)	43 (45)	18 (18)	<b>61 (63)</b>
Марс-кроссери	0 (1)	0 (0)	0 (0)	22 (22)	<b>22 (23)</b>
Астероїди Головного поясу	17 (23)	4 (4)	0 (0)	111 (113)	<b>132 (140)</b>
Троянські астероїди Юпітера	2 (2)	0 (0)	0 (0)	2 (2)	<b>4 (4)</b>
Транснептунові об'єкти	14 (15)	66 (71)	0 (0)	1 (1)	<b>81 (87)</b>
всього	33 (41)	70 (75)	43 (45)	154 (156)	<b>300 (317)</b>

Викладено нові особливості спостереження астероїдів на телескопі ОМТ–800 при їх русі по геліоцентричних орбіт. Для підвищення граничної зоряної величини спостережуваних об'єктів, а також для астрометричних редукцій зображень і отримання диференціальних екваторіальних координат спостережуваних об'єктів застосований програмний пакет CoLiTec [30], наданий нам його розробниками.

Результати спостережень задовольняють вимогам до точності, що пред'являються Minor Planet Center [36] і публікуються в щомісячних рапортах [37].

Відправлені дані використовуються для уточнення Кеплерових елементів орбіт астероїдів, які в свою чергу необхідні нам для побудови чисельної моделі руху астероїда в Сонячній системі. Кеплерові елементи – шість елементів орбіти, що визначають положення небесного тіла в просторі в наближенні задачі двох тіл [26]: велика піввісь, ексцентриситет, нахил, довгота висхідного вузла, аргумент перигелію, середня аномалія.

В ніч з 3 на 4 січня 2017 року було виявлено (V. Kashuba, V. Troianskyi) [MPS 757613] невідомий об'єкт. Отриманні спостереження були використані для побудови первинної орбіти об'єкта методом Väisälä, реалізованим програмно автором дисертації. Невідомий об'єкт був ідентифікований, як астероїд Головного поясу.

Метод Väisälä [32], відрізняється винятковою простотою формул які застосовуються. Він був широко використаний на практиці, в разі коли є дуже коротка дуга спостережень, яка не достатня, щоб визначити "реальну" орбіту і передбачити позицію об'єкта протягом наступного тижня або близько того. Так само, метод дозволяє отримати досить хорошу первинну орбіту для подальшого уточнення одним з ітераційних методів.



Всі орбіти, розраховані, починаючи з 1935 року на обсерваторії Turku, були отримані цим методом. Під керівництвом Väisälä в обсерваторіях Turku [38] і Tuorla [39] займалися пошуком комет і астероїдів (в цілому його групою було відкрито 7 комет і 807 астероїдів).

Даний метод активно використовується для пошуку первинних орбіт малих тіл Сонячної системи на коротких дугах спостережень в IAU Minor Planet Center.

Після побудови орбіти невідомий об'єкт було повторно знайдено та отримано його позиційні спостереження 26 січня 2017 року. IAU Minor Planet Center астероїду присвоєно назва 2017 AB8. Далі орбіта була пов'язана з астероїдом 2014 OD380. Астероїд 2014 OD380 вперше спостерігали в обсерваторії Pan-STARRS 1, Haleakala [40] в 2014 році. Далі, було кілька вдалих не пов'язаних між собою спостережень даного астероїда в 2015 році, після кожного з яких він губився зважаючи на недостатню для побудови пошукової ефемериди кількості і тривалість спостережень.

20 січня 2017 року був знайдений (V. Kashuba, V. Troianskyi) [MPS 766258] ще один невідомий об'єкт. Невідомий об'єкт був ідентифікований, як астероїд із групи A33.

Отриманні спостереження були використані для побудови первинної орбіти об'єкта методом Väisälä. Після побудови орбіти невідомий об'єкт повторно виявлений 31 січня 2017 року. В IAU Minor Planet Center астероїду присвоєно назва 2017 BC94.

**У Розділі II "Динамічна модель астероїдної системи"** розглянуті структурні складові чисельної моделі, що використовується для детального вивчення еволюції орбіт супутників систем малих тіл. Наведені рівня руху, в координатній формі.

Розглянемо задачу  $N$  тіл в формулюванні Ньютона [26]. Нехай вектор  $\vec{r}_i$  з компонентами  $x_i, y_i, z_i$  визначає положення точки  $m_i$  відносно початку системи відліку. Сила тяжіння, яку відчуває точка  $m_i$  зі сторони точки  $m_j$ , по величині дорівнює  $Gm_i m_j / r_{ij}^2$ , а по напрямку збігається з вектором  $\vec{r}_j - \vec{r}_i$ . Сили, діючі з боку всіх точок  $m_j$  на масу  $m_i$ , будуть дорівнювати

$Gm_i \sum_{j=1}^{n'} m_j \frac{\vec{r}_j - \vec{r}_i}{r_{ij}^3}$  і тому:

$$\ddot{\vec{r}}_i = G \sum_{j=1}^{n'} m_j m_i \frac{\vec{r}_j - \vec{r}_i}{r_{ij}^3}, \quad (3)$$

відмітимо, що  $\vec{r}_j - \vec{r}_i = \vec{r}_{ij}$  (5) (в координатах:  $r_{ij}(x_j - x_i, y_j - y_i, z_j - z_i)$ ), тоді

$$\ddot{\vec{m}_i \vec{r}_i} = G \sum_{j=1}^{n'} m_i m_j \frac{\vec{r}_{ij}}{r_{ij}^3}. \quad (4)$$

Система рівнянь (4), виходить з прирівнювання виразів для закону всесвітнього тяжіння і II закону Ньютона. Штрих над знаком підсумовування означає пропуск значень, коли  $i = j$ . У проекціях на осі координат:

$$\begin{cases} m_i \ddot{x}_i = -G \sum_{j=1}^{n'} m_i m_j \frac{x_i - x_j}{r_{ij}^3} \\ m_i \ddot{y}_i = -G \sum_{j=1}^{n'} m_i m_j \frac{y_i - y_j}{r_{ij}^3} \\ m_i \ddot{z}_i = -G \sum_{j=1}^{n'} m_i m_j \frac{z_i - z_j}{r_{ij}^3} \end{cases}, \quad (5)$$

Маємо  $3N$  диференціальних рівнянь другого порядку. Для вирішення цієї системи треба мати  $6N$  початкових умов  $(x_i, \dot{x}_i, y_i, \dot{y}_i, z_i, \dot{z}_i)$ , відповідно,  $6N$  інтегралів руху.

Розкладання по сферичним функціям, гравітаційний потенціал тіла довільної форми виглядає наступним чином:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{Gm}{r^2} \sum_{\ell=0}^{\infty} (\ell+1) \left(\frac{a_e}{r}\right)^{\ell} \sum_{k=0}^{\ell} P_{\ell,k}(\sin \phi) [C_{\ell,k} \cos k\lambda + S_{\ell,k} \sin k\lambda] \\ \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{Gm}{r^2} \sum_{\ell=1}^{\infty} \left(\frac{a_e}{r}\right)^{\ell} \sum_{k=0}^{\ell} \frac{\partial P_{\ell,k}(\sin \phi)}{\partial \phi} [C_{\ell,k} \cos k\lambda + S_{\ell,k} \sin k\lambda] \\ \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{Gm}{r^2} \sum_{\ell=1}^{\infty} \left(\frac{a_e}{r}\right)^{\ell} \sum_{k=1}^{\ell} k \frac{P_{\ell,k}(\sin \phi)}{\cos \phi} [-C_{\ell,k} \sin k\lambda + S_{\ell,k} \cos k\lambda] \end{cases}, \quad (6)$$

де:  $r$  – відстань від центру мас тіла,  $a_e$  – середній екваторіальний радіус тіла, що притягує,  $C_{\ell,k}, S_{\ell,k}$  – коефіцієнти розкладання гравітаційного поля,  $r, \phi, \lambda$  – координати в сферичній системі відліку об'єкта в гравітаційному полі центрального тіла,  $P_{\ell,k}$  – приєднані функції Лежандра.

Коефіцієнти  $C_{\ell,k}, S_{\ell,k}$  залежать від форми тіла і розподілу мас усередині нього і є безрозмірними. Для великих планет, Сонця і Місяця, відома велика кількість цих коефіцієнтів.

При розгляді моделі гравітаційного поля астероїда, малого тіла Сонячної системи, прийнято спрощення, що густина  $\rho$  по всьому об'єму астероїда константа і поверхня астероїда, в першому наближенні, апроксимується тривісним еліпсоїдом.

В результаті тяжіння супутника на кожен елемент центрального астероїда діє сила і викликає приливну деформацію. Внаслідок цієї деформації тяжіння астероїда змінюється, виникають додаткові сили, які характеризуються додатковим потенціалом [29]:

$$\begin{cases} a_{Tx} = \frac{Gm_{St}a_e^5}{x_{ASt}^6} P_2(\cos\theta) \\ a_{Ty} = \frac{Gm_{St}a_e^5}{y_{ASt}^6} P_2(\cos\theta), \\ a_{Tz} = \frac{Gm_{St}a_e^5}{z_{ASt}^6} P_2(\cos\theta) \end{cases} \quad (7)$$

де:  $m_{St}$  – маса супутника астероїда,  $r_{ASt}(x_{ASt}, y_{ASt}, z_{ASt})$  – вектор положення супутника щодо астероїда. У нашому випадку кут  $\theta$  – кут між напрямом на супутник і приливним горбом.

Прискорення, зумовлене Сонцем, вісьмома великими планетами і Місяцем  $a_B$  розраховуємо за допомогою наступного виразу [29]:

$$\begin{cases} a_{Bx} = Gm_B \left( \frac{x_B - x_{St}}{r_o^3} - \frac{x_B}{r_B^3} \right) \\ a_{By} = Gm_B \left( \frac{y_B - y_{St}}{r_o^3} - \frac{y_B}{r_B^3} \right), \\ a_{Bz} = Gm_B \left( \frac{y_B - z_{St}}{r_o^3} - \frac{y_B}{r_B^3} \right) \end{cases} \quad (8)$$

де  $r_o$  – відстань від центру мас масивного тіла Сонячної системи (Місяця, Сонця, планети) до супутника,  $r_B$  – відстані від масивного тіла Сонячної системи (Місяця, Сонця, планети) до центрального астероїда даної системи,  $m_B$  – маса масивного тіла Сонячної системи (Місяця, Сонця, планети),  $x_{St}, y_{St}, z_{St}$  – координати супутника астероїда,  $x_B, y_B, z_B$  – координати масивного тіла Сонячної системи (Місяця, Сонця, планети) в астероїдоцентричній системі координат.

В теорії руху супутників астероїдів необхідно враховувати і тиск сонячного світла на їх поверхню. Для цього використовувалося розкладання прискорення  $a_{Lp}$ , обумовленого тиском сонячного світла [28], [3]:

$$\begin{cases} a_{Lpx} = \left(1 + \frac{4}{9}\delta\right) q \frac{S}{m} \Psi\left(\frac{r_S}{r_0}\right) \frac{x_{Sf} - x_S}{r_0} \\ a_{Lpy} = \left(1 + \frac{4}{9}\delta\right) q \frac{S}{m} \Psi\left(\frac{r_S}{r_0}\right) \frac{y_{Sf} - y_S}{r_0} \\ a_{Lpz} = \left(1 + \frac{4}{9}\delta\right) q \frac{S}{m} \Psi\left(\frac{r_S}{r_0}\right) \frac{z_{Sf} - z_S}{r_0} \end{cases}, (9)$$

де:  $\delta$  – геометричне альbedo,  $q = 4,5605 \cdot 10^{-6} \frac{H}{M^2}$  – сонячна стала,  $S$  – міделевий переріз супутника астероїда,  $m$  – маса супутника астероїда,  $\Psi$  – тіньова функція,  $r_S$  – відстань астероїда від Сонця.  $x_A, y_A, z_A$  – координати астероїда,  $x_S, y_S, z_S$  – координати Сонця.

**У Розділі III "Еволюція астероїдних систем"** вперше розраховані умови розриву 168 астероїдних систем, вперше розраховані резонанси в деяких з них.

Різницю прискорень в системі координат одного нерухомого центру, коли супутник знаходиться між планетою і астероїдом можна записати у наступному вигляді:

$$\Delta a = \frac{GM_p}{(r-d)^2} - \frac{GM_p}{r^2} = \frac{GM_p}{r^2} \left( \frac{1}{\left(1 - \frac{d}{r}\right)^2} - 1 \right), (10)$$

де  $M_p$  – маса планети,  $r$  – планетоцентрична відстань астероїдної системи,  $d$  – відстань між астероїдом і його супутником.

З виразу (10) отримуємо:

$$r = \left( \frac{2M_p}{M_A} \right)^{\frac{1}{3}} d. (11)$$

Як бачимо, в першому наближенні коефіцієнт відриву компонента системи залежить лише від взаємної відстані  $d$  між компонентами та їх маси.

Вперше розраховані орбітальні і фізичні характеристики гіпотетичного супутника-пастуха у астероїда (10199) Chariklo. У 2014 році було повідомлено про відкриття [25] двох кілець навколо (10199) Chariklo і він став п'ятим об'єктом Сонячної системи у якого виявлена система кілець, після Юпітера, Сатурна, Урана і Нептуна. Головний компонент системи є найбільшим кентавром.

Астероїд оточений двома вузькими і щільними кільцями  $C1R$  і  $C2R$  шириною 6600 і 3800 метрів з оптичною густиною 0.38 і 0.06 відповідно. Радіус кілець дорівнює  $390600 \pm 3300$  метрів і  $404800 \pm 3300$  метрів відповідно.

Вузькі, ексцентричні кільця повинні ерозіювати на проміжках часу, значно менших, ніж вік Сонячної системи. Той факт, що ці кільця спостерігаються, означає або те, що ми живемо в особливу епоху, коли подібні кільця існують, або те, що є певний механізм утримування, який зберігає властивості кілець незмінними на тривалих інтервалах часу.

Розглянемо час "життя" кілець. Тобто ерозія нічим не утримуваних вузьких кілець має відбуватися через низку ефектів: взаємних зіткнень частинок кілець, ефекту Пойнтінга-Робертсона, диференціальної прецесії. Детальний вивід формул для часу ерозії кілець, розглянуто Murray and Dermot [29] у своїй книзі. В роботі Braga-Ribas та інших [25] розраховано час ерозії кілець астероїда через зіткнення частинок і ефекту Пойнтінга-Робертсона, ми розрахували час ерозії через третій ефект – диференціальну прецесію кілець.

Стиснення центрального астероїда змушує витягнути орбіту прецесувати зі швидкістю, приблизно рівною

$$\dot{\omega} \approx 3\pi J_2 \left( \frac{R_A}{a_{St}} \right)^2 T, [29] (12)$$

де  $J_2$  – друга зональна гармоніка ( $0.014 \pm 0.002$ ), обчислена нами по раніше запропонованому алгоритму [4],  $R_A$  – радіус астероїда,  $a_{St}$  – велика піввісь орбіти ( $400300 \pm 9700$  м) ймовірного супутника-пастуха,  $T$  – період обертання (0,74 днів і 0,78 днів). Тому різниця значень  $\dot{\omega}$  для внутрішнього і зовнішнього країв ексцентричного кільця (радіальна ширина кільця по великій осі його орбіти, різна) по великій піввісі задається формулою

$$\delta\dot{\omega} \approx -\frac{7}{2} \dot{\omega} \frac{W}{a_{St}}, [29] (13)$$

де  $W$  – радіальна ширина кільця. Отже, повинна існувати диференціальна прецесія, оскільки внутрішній край прецесує швидше, ніж зовнішній. Кільце ерозує за характерний час  $\frac{2\pi}{|\delta\dot{\omega}|}$ , що в наших розрахунках становить  $1660_{-146}^{+151}$

діб для  $C1R$  і  $2760_{-67}^{+68}$  діб для  $C2R$ .

Відкриття вузьких кілець Урана дало поштовх розвитку теорії утримання кілець, всупереч зіткненню частинок, ефекту Пойнтінга-Робертсона і диференціальної прецесії. Присутність супутників-пастухів виявилася найбільш правдоподібним поясненням стійкості вузьких кілець. Було припущено [29], що вузьке кільце підтримується супутником.

Припустимо, що люк в кільцях астероїдної системи утворений супутником аналогічно з тим як супутник Пан утворює люк Енке в кільці А Сатурна. Використовуючи формулу (19), виведену з виразу для сфери дії, оцінимо масу супутника-пастуха:

$$m_{St} = \frac{R^{5/2} M_A}{a_{St}^{5/2}} \approx (3.27 \pm 0.19) \times 10^{15} \text{ кг}, \quad (14)$$

де  $R$  – радіус ( $7100 \pm 100$  м) сфери дії [31] супутника-пастуха. Масу ( $M_A$ ) астероїда (10199) Chariklo обчислили за формулою:

$$M_A = \frac{4}{3} \pi a b^2 \rho \approx 7.82 \times 10^{19} \text{ кг}, \quad (15)$$

де  $a$  – велика піввісь еліпсоїда астероїда (289800 м [25]),  $b$  – мала піввісь еліпсоїда астероїда (253800 м [25]),  $\rho$  – густина астероїда ( $10^3$  кг/м<sup>3</sup>) [41].

З уточненого закону Кеплера знайдемо період обертання супутника пастуха навколо головного компонента астероїдної системи:

$$P = \frac{2\pi a_{St}^{3/2}}{\sqrt{G(M_A + m_{St})}} \approx 6.12_{-0.01}^{+0.23} \text{ годин}, \quad (16)$$

Період обертання навколо своєї осі, головного компонента системи дорівнює 7,004 годин, виходячи з цього видно, що система наближається до стану синхронного обертання [29].

Детально розглянуті дев'ять систем ((45) Eugenia, (87) Sylvia, (90) Antiope, (66391) 1999 KW4, (134340) Pluto, (136108) Haumea, (136617) 1994 CC, (153591) 2001 SN263, (385446) Manwe) малих тіл, з подальшим періодограмним аналізом отриманих змін в Кеплерових елементах орбіт. Виявлені періодичні коливання і вікові збурення в Кеплерових елементах орбіт для дев'яти систем.

У **Висновках** містяться результати роботи, отриманих здобувачем за основними напрямками дисертаційної роботи.

В **Додаток** увійшли таблиці та рисунки, що не були розміщені в основний текст і мають допоміжне значення.

## ВИСНОВКИ

Впроваджено та протестовано нове програмне забезпечення для пошуку невідомих об'єктів Сонячної системи, що дозволило підвищити проникну здатність телескопа ОМТ-800 з 19<sup>m</sup> до 21<sup>m</sup>. В результаті оглядових спостережень подвійних і кратних малих тіл Сонячної системи, було

відкрито два малих тіла, одне з яких ідентифіковано як раніше загублений астероїд.

Розраховані відстані розриву для 168 подвійних і кратних малих тіл Сонячної системи.

Знайдено 10 орбітальних, 26 спін-орбітальних і 28 спін-спінових резонансів в обраних подвійних і кратних системах малих тіл.

Вперше обчислені: маса, велика піввісь орбіти, орбітальний період, резонанси, гіпотетичного супутника-пастуха астероїда (10199) Chariklo.

Вперше обчислені 5 коефіцієнтів розкладання по сферичним функціям потенціалу гравітаційного поля обраних компонентів астероїдних систем. Не всі значення збігаються з отриманими раніше результатами попередніх робіт. Це може бути пов'язано з відмінністю вихідних даних та методами їх отримання.

Побудована чисельна модель руху в системах подвійних та кратних малих тіл Сонячної системи. В моделі враховано тяжіння Сонця та великих планет, асиметрію малих тіл, тиск сонячного світла з урахуванням тіньової функції. Модель дозволила виявити деякі особливості еволюції орбіт супутників.

Чисельна модель апробована на подвійних і кратних малих тілах Сонячної системи: (45) Eugenia, (87) Sylvia, (90) Antiope, (66391) 1999 KW<sub>4</sub>, (134340) Pluto, (136108) Haumea, (136617) 1994 CC, (153591) 2001 SN<sub>263</sub>, (385446) Manwe. Розраховані зміни Кеплерових елементів орбіт на інтервалі 100 років і 1000 років в цілому підтверджують результати, отримані іншими авторами. Знайдено вікові зміни в деяких Кеплерових елементах орбіт супутників. У всіх елементах орбіт обчислені величини періодичних змін і запропоновані можливі причини їх походження. Так само знайдені однакові періодичні коливання в Кеплерових елементах орбіт одного і того ж супутника.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:**

### **Публікації:**

1. Troianskyi V.V. Method for calculating orbits of near-Earth asteroids observed with telescope OMT-800 / V.V. Troianskyi, O.A. Bazyey, V.I. Kashuba, V.V. Zhukov, S.O. Korzhavin // *Odessa Astronomical Publications*. – 2014. – Vol. 27(2). – P. 154-155.
2. Troianskyi V.V. Determination of the small Solar system bodies orbital elements from astrometric observations with OMT-800 telescope / V.V. Troianskyi, O.A. Bazyey, V.I. Kashuba, V.V. Zhukov // *Third Gaia Fun SSO "Gaia Follow-up Network for Solar System Objects"*. – Paris: IMCCE. – 2015. – Vol. 3. – P. 127-130.

3. Troianskyi V.V. The Solar-radiation pressure effects on the orbital evolution of asteroid moons / V.V. Troianskyi, O.A. Bazyey // *Odessa Astronomical Publications*. – 2015. – Vol. 28(1). – P. 76-77.
4. Troianskyi V.V. The impact of the non-sphericity of the gravitational field of the asteroid on the evolution of the orbits of its satellites / V.V. Troianskyi // *Odessa Astronomical Publications*. – 2015. – Vol. 28(2). – P. 299-303.
5. Troianskyi V.V. Disintegration's condition of binary and multiple asteroids under the action of tidal forces Major Solar system planets / Troianskyi V.V., Radchenko K.O., Bazyey O.A. // *Astronomical School's Report*. – 2015. – Vol. 11(2). – P. 145-156.
6. Troianskyi V.V. Resonances in the asteroids systems / V.V. Troianskyi // *Odessa Astronomical Publications*. – 2016. – Vol. 29. – P. 221-223.
7. Troianskyi V.V. Dynamics of the asteroid rings (10199) Chariklo / Troianskyi V.V., Bazyey O.A. // *Astronomical School's Report*. – 2016. – Vol. 12(2). – P. 122-124.
8. Bonomi R. Observations and Orbits of Comets / Bonomi R., Facchini M., Negrelli P [...] Troianskyi V. [...] // *Minor Planet Electronic Circ.* – 2014, 2015, 2016, 2017. No.2015-J41, No.2015-Q71, No.2015-U54, No.2015-N37, No.2015-E14, No.2015-N31, No. 2016-Q04, No. 2016-M09, No. 2016-K18, No. 2017-A77.

**Тези доповідей на конференціях опубліковані в таких виданнях:**

9. Троянский В.В. Эволюция орбит тройных астероидов 1994 CC и 2001 SN263, сближающихся с Землей / Троянский В.В., Базей А.А. // XVI Міжнародна наукова конференція "Астрономічна школа молодих вчених". Програма і тези доповідей. Кіровоград. – 2014. – С. 65.
10. Троянский В.В. Методика обработки наблюдений и прогнозирование движения астероидов сближающихся с Землей по данным телескопа ОМТ-800 / Троянский В.В., Базей А.А., Кашуба В.И., Жуков В.В. // 14-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radioastronomy and Astrobiology". Program and abstracts. Odessa. – 2014. – P. 50.
11. Троянский В.В. Эволюция ретроградных орбит спутников двойных и кратных астероидов из группы AC3 / Троянский В.В., Базей А.А. // 14-th Ukrainian conference on space research. Abstracts. Kyiv. – 2014. – P. 35.
12. Троянский В.В. Области устойчивого движения на орбитах спутников двойных и кратных астероидов сближающихся с Землей / Троянский В.В., Базей А.А. // VI Memorial International conference "САММАС-2014". Book of selected papers and abstracts. Vinnytsia. – 2014. – P. 88.



13. Троянский В.В. Орбитальный резонанс спутников астероидов сближающихся с Землей / Троянский В.В., Базей А.А. // Сьома міжнародна наукова конференція "Вибрані питання астрономії та астрофізики". Програма та тези. Львів. – 2014. – С. 42.
14. Troianskyi V.V. The impact of the non-sphericity of the gravitational field of the asteroid on the evolution of the orbits of its satellites / V.V. Troianskyi, O.A. Bazyey // 22rd Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts. Kyiv. – 2015. – P. 55.
15. Troianskyi V.V. Determination of small Solar system bodies orbital elements on astrometrical observations with OMT-800 telescope / V.V. Troianskyi, O.A. Bazyey, V.I. Kashuba, V.V. Zhukov // Gaia Fun SSO "Gaia Follow-up Network for Solar System Objects" #3. Programme and Abstracts. – Paris. – 2014. – P. 22.
16. Радченко К.О. Кратні астероїди головного поясу як елементи для утворення ретроградних супутників планет-гігантів / Радченко К.О., Троянський В.В. // XVII Міжнародна наукова конференція "Астрономічна школа молодих вчених". Програма і тези доповідей. Житомир. – 2015. – С. 67.
17. Troianskyi V. Dynamics of binary and triple asteroids / V. Troianskyi // International scientific and methodological conference "KOLOS 2015". Book of abstracts. Stakcin. – 2015. – P.6.
18. Troianskyi V. Numerical simulation of binary and multiple asteroids system dynamics / V. Troianskyi, O. Bazyey // XVI Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radioastronomy and Astrobiology". Abstracts Book. Odessa. – 2016. – С. 39.
19. Troianskyi V. Numerical simulation of binary and multiple asteroids system dynamics / V. Troianskyi, O. Bazyey // Actual Questions of Ground-based Observational Astronomy "MAO-195". Mykolaiv. – 2016. – P. 25.
20. Горбачова А. Числова модель руху супутників карликової планети (134340) PLUTO / А. Горбачова, В. Троянський, О. Базей // VIII наукова конференція "Вибрані питання астрономії та астрофізики". Програма та тези. Львів. – 2016. С. – 45.
21. Troianskyi V. Dynamics of multiple system Pluto / Troianskyi V., Bazyey O., Zhukov V. // International scientific and methodological conference "KOLOS 2015". Book of abstracts. Stakcin. – 2016. – P.7.
22. Horbachova A. Dynamics of multiple system Pluto / Alice Horbachova, V. V. Troianskyi, O. A. Bazyey // 24rd Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. Abstracts. Kyiv. – 2017. – P. 46.
23. Троянский В. Резонанс Kozai в астероидных системах / Троянский В.В., Базей А.А. // XIX Міжнародна наукова конференція

"Астрономічна школа молодих вчених". Програма і тези доповідей. Біла Церква. – 2017. – С. 76.

### СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

24. Benner, L. A. M. 2006 VV\_2 / L. A. M. Benner, S. J. Ostro, and J. D. Giorgini // Jet Propulsion Laboratory (JPL). – 2007. – *IAUC* 8826.
25. Braga-Ribas F. A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo / F. Braga-Ribas, B. Sicardy [...] D. G. Lambas // *Nature*. – 2014. – Vol. 508. – P. 72.
26. Duboshin G. N. in: *Celestial Mechanics and Astrodynamics / Duboshin G. N. // A Handbook, Moscow, Nauka. – 1976.*
27. Marchis F. Discovery of the triple asteroidal system 87 Sylvia / Marchis, F., P. Descamps, D. Hestroffer, and J. Berthier // *Nature*. – 2005. – Vol. 436. – P. 822.
28. Martysheva A. SOLAR RADIATION PRESSURE EFFECTS ON ASTEROID MOTIONS, INCLUDING NEAR-EARTH OBJECTS / Martysheva, A., Petrov, N., Polyakhova, E.N. // *Messenger of St. Petersburg University*. – 2005. – Vol. 2(60). – P. 135.
29. Murray C.D. in: *Solar System dynamics / Cart D. Murray, Stanley F. Dermot // Cambridge U Press. – 2010.*
30. Savanevich V. The program of automated detection of faint celestial bodies CoLiTec / Savanevich V., Bryukhovetskiy A., Kozhuhov A., Dickov E., Vlasenko V. // *Space Science and Technology*. – 2012. – Vol. 18(1). – P. 39.
31. Seefelder W. in: *Lunar Transfer Orbits Utilizing Solar Perturbations and Ballistic Capture, Herbert Utz Verlag, Issenschaft Munchen. – 2012.*
32. Väisälä Y. Eine einfache Methode der Bahnbestimmung / Väisälä Y. // *Ann. Acad. Scientiarum Fennicae, Ser. A, t. LII. – 1940. – Vol. 2. – P. 5.*
33. Veverka J. Dactyl: Galileo observations of Ida's satellite / J. Veverka, P.C. Thomas, P. Helfenstein, P. Lee, A. Harch, S. Calvo, C. Chapman, M.J.S. Belton, K. Klaasen, T.V. Johnson, M. Davies // *Icarus*. - 1996. – Vol. 120(1). – P. 200.
34. BINARY AND TERNARY NEAR-EARTH ASTEROIDS DETECTED BY RADAR [Електронний ресурс] - URL: <https://echo.jpl.nasa.gov/~lance/binary.neas.html> (01.05.2017).
35. IAU International Astronomical Union [сайт] - URL: <https://www.iau.org/> (01.05.2017).
36. IAU Minor Planet Center [сайт] - URL: [www.minorplanetcenter.net](http://www.minorplanetcenter.net) (01.05.2017).

37. IAU Minor Planet Center [сайт] - URL: [http://www.minorplanetcenter.net/iau/ECS/MPCArchive/MPCArchive\\_TBL.html](http://www.minorplanetcenter.net/iau/ECS/MPCArchive/MPCArchive_TBL.html) (01.05.2017).
38. University of Turku [сайт] - URL: <http://www.astro.utu.fi/TAS/TuorlaObs/isoheikkila/index.eng.html> (01.05.2017).
39. Turun yliopisto University of Turku [сайт] - URL: <http://www.utu.fi/fi/Sivut/home.aspx> (01.05.2017).
40. The Pan-STARRS1 data archive home page [сайт] - URL: <http://panstarrs.stsci.edu/> (01.05.2017).
41. Johnston's Archive [Електронний ресурс] - URL: <http://www.johnstonsarchive.net/astro/astmoons/am-10199.html> (01.05.2017).

## АНОТАЦІЯ

**Троянський В.В. Динаміка обраних подвійних і кратних малих тіл Сонячної системи.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.01 "Астрометрія і небесна механіка". – Національний авіаційний університет, Київ, 2017.

Робота присвячена дослідженню динаміки супутників в подвійних і кратних системах малих тіл. Основою дослідження є унікальне комп'ютерне моделювання, виконане автором, а також отримані на телескопі ОМТ-800 НДІ «Астрономічна обсерваторія» ОНУ імені І.І. Мечникова астрометричні спостереження астероїдів в навколосемному просторі. В роботі використані аналітичні розрахунки стійкості руху супутників в подвійних і потрійних астероїдних системах.

Метою дисертаційної роботи є вивчення динаміки супутників астероїдів, реалізація методик визначення коефіцієнтів розкладання гравітаційного поля компонентів астероїдних систем та дослідження внеску періодичних и вікових збурень в еволюцію орбіт астероїдних систем.

Основні методи дослідження – астрометричні оптичні спостереження астероїдів, комп'ютерне моделювання руху в подвійних і кратних астероїдних системах на основі чисельного інтегрування рівнянь руху в координатах методом Еверхарта п'ятнадцятого порядку. Для інтерпретації отриманих величин застосовувався періодограмний аналіз.

Впроваджено нове програмне забезпечення для пошуку невідомих об'єктів Сонячної системи, що дозволило підвищити проникну здатність телескопа ОМТ-800 з  $19^m$  до  $21^m$ . В результаті оглядових спостережень подвійних і кратних малих тіл Сонячної системи, було відкрито два малих тіла, одне з яких ідентифіковано як раніше загублений астероїд.

Розраховані умови розриву для 168 подвійних і кратних малих тіл Сонячної системи.

Знайдено 10 орбітальних, 26 спін-орбітальних і 28 спін-спінових резонансів в обраних подвійних і кратних системах малих тіл.

Вперше обчислені: маса, велика піввісь орбіти, орбітальний період, резонанси, гіпотетичного супутника-пастуха астероїда (10199) Chariklo.

Вперше обчислені 5 коефіцієнтів розкладання по сферичним функціям потенціалу гравітаційного поля обраних компонентів астероїдних систем. Не всі значення збігаються з отриманими раніше результатами попередніх робіт. Це може бути пов'язано з відмінністю вихідних даних та методами їх отримання.

Побудована чисельна модель руху в системах подвійних та кратних малих тіл Сонячної системи. В моделі враховано тяжіння Сонця та великих планет, асиметрію малих тіл, тиск сонячного світла з урахуванням тіньової функції. Модель дозволила виявити деякі особливості еволюції орбіт супутників.

Чисельна модель апробована на подвійних і кратних малих тілах Сонячної системи: (45) Eugenia, (87) Sylvia, (90) Antiope, (66391) 1999 KW<sub>4</sub>, (134340) Pluto, (136108) Haumea, (136617) 1994 CC, (153591) 2001 SN<sub>263</sub>, (385446) Manwe. Отримані зміни Кеплерових елементів орбіт на інтервалі 100 років і 1000 років в цілому підтверджують результати, отримані іншими авторами. Знайдено вікові зміни в деяких Кеплерових елементах орбіт супутників. У всіх елементах орбіт обчислені величини періодичних змін і запропоновані можливі причини їх походження. Так само знайдені однакові періодичні коливання в Кеплерових елементах орбіт одного і того ж супутника.

На основі побудованої моделі астероїдної системи стало можливим отримання фотометричних характеристик системи, які спостерігаються з Землі. Порівняння кривих блиску астероїдних систем з модельними значеннями дозволить виявити особливості будови і фізичних властивостей поверхонь малих тіл.

**Ключові слова:** астероїдна система, супутник-пастух, резонанси в астероїдних системах, еволюція орбіт супутників астероїдів.

## ABSTRACT

**Troianskyi V.V. Dynamics of selected binary and multiple small Solar system bodies.** – Qualifying scientific work as a manuscript.

The thesis of the Ph.D., specialty 01.03.01 "Astrometry and Celestial mechanics". – National Aviation University, Kyiv, 2017.

This thesis devoted to research the dynamics of satellites in binary and multiple systems of small bodies. The basis of the study is the unique computer simulation performed by the author, and observations of asteroids in near-Earth space received on OMT-800 telescope in Astronomical Observatory of Odessa I.I.

Mechnikov National University. In the thesis used an analytical calculation of stability of satellites movement in binary and triple asteroid systems.

The purpose of the thesis is to study the dynamics of satellites, asteroids, implementation methodologies of determination the expansion coefficients of the gravitational field of asteroid components and research contribution of periodic disturbances in the annual evolution of asteroid systems orbits.

The main methods: optical astrometric observations of asteroids, computer modeling of a binary and multiple asteroid systems based on numerical integration of the equations of motion in the coordinates by Everhart fifteenth order. For interpretation of the obtained values, periodogram analysis used.

Implemented new software to search for unknown objects in the Solar system, thus improving penetrating capability of the telescope OMT-800 from 19 Mag to 21 Mag. As a result of survey observations of binary and multiple Solar system bodies two new small bodies was discovered. One of them identified as previously lost asteroid.

Conditions of systems gap calculated for 168 binary and multiple systems of Solar system small bodies.

10 orbital, 26 spin-orbital and 28 spin-spinal resonances founded in selected binary and multiple systems.

The first time calculated the mass, the semi-major axis, the orbital period, resonances of hypothetical shepherd satellite of the asteroid (10199) Chariklo.

The first time five coefficients of expansions of gravitational field in spherical functions calculated for selected asteroid systems. Not all values are consistent with results previously obtained in previous work. Probably this connected with difference of data and methods of obtaining them.

The numerical model of motion was built for systems of binary and multiple small bodies of the Solar system. The model takes into account gravity of the Sun and the major planets, small bodies' asymmetry, the sunlight pressure considering the shadow function. The model allows to find some of the features of the evolution of satellites orbits

The numerical model approbated on binary and multiple small bodies of the Solar system: (45) Eugenia, (87) Sylvia, (90) Antiope, (66391) 1999 KW4, (134340) Pluto, (136108) Haumea, (136617) 1994 CC, (153591) 2001 SN263, (385446) Manwe. Obtained changes Keplerian orbital elements for range 100 years and 1000 years generally confirms the results obtained by other authors. Annual changes in certain Keplerian orbital elements founded. For all orbital elements calculated values of periodical changes and suggested possible causes of their origin. Also, found in the same periodic oscillations in Keplerian orbital elements of the same satellite.

Based on the developed model of asteroid system became possible to obtain photometric characteristics of the system observed from Earth. Comparison

of asteroid light curves with model values will identify structural features and physical properties of surfaces of small bodies.

**Keywords:** Asteroid system, satellite shepherd, resonances in asteroid systems, orbital evolution of asteroids satellites.



Підп. до друку 23.05.2017. Формат 60x84/16. Папір офсетний.  
Друк різнографічний. Умовних друк. арк. 1,2  
Тираж 100 прим. Замовлення № 2365

Надруковано в копіювальному центрі «**На Канатній**»  
м. Одеса, вул. Канатна 60  
Тел. 777-60-96