

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Чорний Василь Григорович

УДК 523.44+520.82

**ФОТОМЕТРІЯ МАЛИХ АСТЕРОЇДІВ ГОЛОВНОГО ПОЯСУ.
ОБЕРТАННЯ ТА ПОДВІЙНІСТЬ**

01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Науково-дослідному інституті астрономії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
професор
Лупішко Дмитро Федорович,
НДІ астрономії
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна МОН України,
провідний науковий співробітник.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Розенбуш Віра Калениківна,
Головна астрономічна
обсерваторія НАН України,
головний науковий співробітник;

кандидат фізико-математичних наук
Кошкін Микола Іванович,
Науково-дослідний інститут «Астрономічна
обсерваторія» Одеського національного
університету імені І. І. Мечникова МОН України,
заступник директора з наукової роботи.

Захист відбудеться « 1 » червня 2018 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою: ГАО НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27, 03143, м. Київ.

Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці ГАО НАН України за адресою: ГАО НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27, 03143, м. Київ.

Автореферат розісланий « _25_ » квітня 2018 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук

І. Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В останні десятиліття фотометрія показала себе як ефективний інструмент для виявлення і вивчення подвійних систем серед астероїдів, що зближуються із Землею (АЗЗ), астероїдів головного поясу (АГП) і об'єктів поясу Койпера. Кількість подвійних систем, виявлених у Сонячній системі, вже близько трьох сотень, і більше половини з них виявлено фотометричним методом. Відкриття та подальше вивчення нових кратних систем серед астероїдів головного поясу є дуже важливим з точки зору механізмів походження та еволюції кратних систем в Сонячній системі, а також дає можливість визначати дистанційними методами середню густину і масу астероїдів, що дуже важливо для розуміння їх внутрішньої структури і процесів їх утворення, а також має прикладне значення при плануванні космічних місій до них та для запобігання їх зіткнення з Землею.

Найвні дані свідчать про те, що обертання астероїдів діаметром менше 40 км визначається як еволюцією зіткнень, так і впливом негравітаційних (радіаційних) сил, в першу чергу YORP-ефектом (Yarkovsky–O'Keefe–Radzievskii–Paddack), який веде до зміни швидкості обертання малих астероїдів під дією теплового випромінювання з нагрітої сонячним світлом поверхні астероїдів неправильної форми. Тому одержання нових даних про періоди обертання астероїдів малих розмірів для різних популяцій та узагальнення цих даних дає нам можливість отримувати більш повне уявлення про космогонічні процеси в поясі астероїдів.

Дослідження, що виконані в межах дисертаційної роботи, а саме: а) фотометричні спостереження астероїдів малих розмірів головного поясу з метою одержання високоточних кривих блиску, визначення періодів їх осьового обертання та пошук і виявлення подвійності; б) визначення параметрів нових кратних систем астероїдів і їх аналіз; в) визначення фізичних характеристик – показників кольору ($B - V$) і ($V - R$), абсолютної зоряної величини, діаметра або геометричного альbedo окремих малих астероїдів, у повній мірі визначають її актуальність.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в межах наступних держбюджетних НДР НДІ астрономії Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, де автор брав участь як виконавець:

- «Фотометричні та поляриметричні дослідження астероїдів і комет» (2004–2006 рр., № держ. реєстрації 0104U000666);
- «Фізичні властивості астероїдів, тіл поясу Койпера і комет за даними фотометрії і поляриметрії» (2007–2009 рр., № держ. реєстрації 0107U000675);
- «Телескопічні дослідження астероїдів, тіл поясу Койпера і комет» (2010–2012 рр., № держ. реєстрації 0110U001035);
- «Фізичні властивості малих тіл Сонячної системи за даними телескопічних досліджень і чисельного моделювання» (2013–2015 рр., № держ. реєстрації 0112U006958);
- «Фотометричні та поляриметричні дослідження астероїдів головного поясу, комет і транснептунових об'єктів» (2016–2018 рр., № держ. реєстрації 0116U0008325).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є отримання високоточних кривих блиску малих (діаметром менше 15 км) астероїдів головного поясу, визначення періодів їх осевого обертання; пошук і виявлення подвійності серед астероїдів, що спостерігались, та визначення параметрів кратних систем, а також визначення фізичних характеристик – показників кольору ($B - V$) і ($V - R$), абсолютної зоряної величини, діаметра і/або геометричного альbedo окремих малих астероїдів головного поясу.

Для досягнення мети вирішувалися наступні основні завдання.

1. Проведення детальних ПЗЗ-фотометричних спостережень окремих астероїдів внутрішньої частини головного поясу в стандартних фотометричних смугах BVR .

2. Проведення процедури стандартизації фотометричних вимірювань окремих малих астероїдів, отримання показників кольору ($B - V$) і ($V - R$) і визначення абсолютного блиску досліджуваних об'єктів.

3. Отримання рядів кривих блиску астероїдів з точністю вимірів не гірше 1–3%, аналіз яких дає можливість визначити періоди обертання і виявити можливу подвійність.

4. Визначення параметрів виявлених подвійних систем астероїдів з використанням отриманих фотометричних кривих блиску.

5. Аналіз даних про параметри виявлених подвійних та потрійних систем і про швидкості обертання астероїдів головного поясу діаметром менше 15 км з точки зору можливих механізмів виникнення подвійності і розподілу за швидкостями обертання малих астероїдів зі структурою «купа каміння».

6. Використання даних абсолютної фотометрії окремих малих астероїдів головного поясу для оцінки діаметрів і альbedo вперше спостережуваних астероїдів.

Об'єктами дослідження є астероїди малих розмірів (діаметром менше 15 км) головного поясу, перш за все ті, що не спостерігалися раніше фотометричним методом.

Предмет дослідження – ряди фотометричних кривих блиску окремих астероїдів малих розмірів головного поясу.

Методи дослідження: ПЗЗ-фотометрія, порівняльний аналіз отриманих даних та їх узагальнення, якісна та кількісна інтерпретація результатів спостережень та статистичний аналіз.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Відкрито 15 нових подвійних і 4 потрійних систем серед астероїдів малих розмірів головного поясу і визначено їх параметри: орбітальний період, періоди обертання і співвідношення діаметрів окремих компонентів.

2. Виявлено нову повністю синхронну подвійну систему астероїда 8474 Rettig, яка належить до рідкісної групи подвійних астероїдів з приблизно рівними за розміром компонентами та їх синхронним обертанням. Визначено параметри цієї системи та зроблено оцінку діаметрів компонентів.

3. Протягом 220 ночей проведено фотометричні спостереження 76 астероїдів з діаметрами менше 15 км і на їх основі вперше отримано значення періодів осевого обертання для 70 астероїдів головного поясу, які увійшли складовою частиною до бази даних Міжнародної кооперативної програми BinAstPhotSurvey і міжнародних баз даних «Asteroid Photometric Catalogue» і «Planetary Data System, NASA».

4. Для 25 малих астероїдів головного поясу вперше визначено абсолютні зоряні величини і показники кольору $V - R$, а також зроблено оцінки діаметрів, альbedo і мінералогічного типу поверхонь цих астероїдів. Показано, що величина альbedo малих астероїдів головного поясу, що визначена за даними інфрачервоних вимірювань супутником WISE, завищена приблизно на 30% через систематичні похибки значень абсолютної зоряної величини астероїдів у базах даних Центру малих планет (MPC), які використовувалися при аналізі цих ІЧ-вимірювань.

5. Аналіз отриманих у роботі основних параметрів асинхронних кратних систем, які характеризуються коротким періодом обертання (близьким до межі руйнування) і слабкою подовженістю форми основного компонента, показав, що їх середні характеристики відповідають теоретичним гіпотезам про вплив YORP-ефекту на механізм виникнення подвійності і еволюцію малих астероїдів з внутрішньою структурою типу «купа каміння».

6. Вперше показано, що розподіл за швидкостями обертання малих астероїдів внутрішньої частини головного поясу ($a < 2.6 \text{ a.o.}$) має надлишки швидкого і повільного обертання в порівнянні з розподілом для малих астероїдів зовнішньої частини поясу ($a > 2.6 \text{ a.o.}$). Ці надлишки є наглядним доказом впливу YORP-ефекту на осеве обертання астероїдів малих розмірів у внутрішній частині головного поясу.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність дисертаційної роботи та значення її висновків обумовлені великою кількістю оригінальних фотометричних даних спостережень астероїдів малих розмірів, котрі вже використовуються і можуть бути використані у майбутньому для порівняльного аналізу фізичних властивостей астероїдів різних розмірів та популяцій. Одержані в роботі результати мають також таке практичне значення:

1. Криві блиску, що одержані в результаті фотометричних спостережень малих астероїдів головного поясу, увійшли до Міжнародних баз даних «Asteroid Photometric Catalogue» і «Planetary Data System, NASA» та доступні для широкого використання.

2. Одержані в роботі високоточні криві блиску послужили основою для виявлення подвійності серед малих астероїдів головного поясу і визначення параметрів подвійних і потрійних систем, аналіз яких дає можливість в подальшому детально описати найбільш дієвий механізм виникнення подвійності у астероїдів з внутрішньою структурою типу «купа каміння». Виявлені параметри кратних систем астероїдів мають прикладне значення і можуть використовуватись для обчислення густини і маси астероїдів, а також для розрахунків траєкторій і орбіт при запусках космічних апаратів до таких об'єктів.

3. Одержані оптичні характеристики для 25 малих астероїдів – значення абсолютних зоряних величин і показники кольору – будуть використані в подальшому для уточнення альbedo цих астероїдів та визначення мінералогічного типу їх поверхонь, а також Центром малих планет для ефемеридних обчислень видимих зоряних величин цих астероїдів.

Отримані у дисертації результати можуть бути використані у таких науково-дослідних установах, як ГАО НАН України, НДІ астрономії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України, Радіоастрономічний інститут НАН України, Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, НДІ «Астрономічна обсерваторія» при ОНУ імені І.І. Мечникова, НДІ «Миколаївська астрономічна обсерваторія», Астрофізичний інститут імені В.Г. Фесенкова АН Республіки Казахстан, та інших.

Достовірність і обґрунтованість результатів досліджень підтверджується великою кількістю спостережних ночей з точністю вимірів не гірше 1–3%, використанням відпрацьованих методик підготовки та проведення спостережень, а також високоякісними результатами виявлення подвійності і визначення параметрів 19 кратних систем малих астероїдів, що зафіксовано публікаціями Міжнародного Астрономічного Союзу (СВЕТ IAU). Отримані дані підтверджуються також апробацією результатів досліджень у фахових міжнародних журналах та на міжнародних наукових конференціях.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертації викладено у роботах [1–28]. В статтях, в яких дисертант є першим автором [2, 5] йому належить постановка задачі, відбір об'єктів, обробка спостережного матеріалу, одержання кривих блиску, аналіз результатів і їх інтерпретація, написання і підготовка статей до публікації та відповіді рецензентам. В роботах [1, 4, 6–8] автором проведені спостереження і виконана їх обробка, аналіз отриманих результатів та їх обговорення з співавторами і підготовка до опублікування. В роботі [3] автор спільно з іншими співавторами брав участь у спостереженнях, обробці даних і обговоренні результатів.

В роботах [9–28], присвячених виявленню подвійних астероїдів і визначенню їх параметрів, автору належать дані спостережень і їх обробка, аналіз отриманих результатів та їх обговорення з співавторами, підготовка до опублікування.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи обговорювалися на наукових семінарах НДІ астрономії ХНУ імені В.Н. Каразіна і ГАО НАН України та були представлені або доповідалися на наступних наукових конференціях:

- «Asteroids, Comets, Meteors. АСМ–2002» (Берлін, Німеччина, 2002 р.);
- «Photometry and polarimetry of Asteroids: Impact on Collaboration» (Харків, Україна, 2003 р.);
- «Comets, Asteroids, Meteors, Meteorites, Astroblems, Craters – САММАС» (Вінниця, Україна, 2002 р.; 2005 р.);
- «Astronomy and Space Physics at Kyiv University» (Київ, 2005 р.);

- «Enlargement of Collaboration in Ground-Based Astronomical Research in SEE Countries. Studies of the Near-Earth and Small Bodies of the Solar System» (Миколаїв, Україна, 2006 р.);
- «Solar System Bodies: From Optics to Geology» (Харків, 2008 р.);
- «EPSC-DPS Joint Meeting 2011» (Нант, Франція, 2011 р.);
- «Asteroids, Comets, Meteors. ACM–2014» (Гельсінкі, Фінляндія, 2014 р.);
- «The 4th Workshop on Binaries in the Solar System» (Прага, Чехія, 2016 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи викладені у 35 публікаціях, з яких 8 – статті у спеціалізованих реферованих журналах «Astronomy and Astrophysics», «Icarus», «Planetary and Space Science», «Minor Planet Bulletin» [1–8]; 20 – повідомлення Міжнародного Астрономічного Союзу (IAU CBET) про відкриття подвійних астероїдів [9–28], а також 7 – у тезах міжнародних та вітчизняних конференцій [29–35]. Повний список публікацій розміщений в Додатку А.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури і трьох додатків. Повний обсяг дисертації – 185 сторінок, у тому числі список літератури із 177 найменувань. Робота ілюстрована 94 рисунками та має 8 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ включає обґрунтування актуальності теми дисертації, її зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету і основні задачі дослідження та методи їх вирішення. Показано наукову новизну отриманих результатів та розкрито їх практичне значення. Також визначено особистий внесок здобувача в опубліковані роботи та описано апробацію отриманих результатів дисертаційної роботи.

В розділі 1 «Дослідження фізичних характеристик астероїдів за фотометричними спостереженнями» міститься огляд актуальних проблем астероїдної фотометрії та окреслюється коло завдань, які вирішувались у дисертаційній роботі. У першому підрозділі розглянуто поняття фотометричних кривих блиску, які характеризують зміну блиску астероїда внаслідок його осьового обертання; параметри кривих блиску (період P і амплітуда A) та їх аналіз; статистичні дані про періоди обертання, а також історію досліджень результатів розподілу швидкостей обертання астероїдів для різних розмірів, типів і груп.

Другий підрозділ присвячений опису фотометричного методу виявлення подвійних астероїдів. Основою цього методу є аналіз високоточних складених кривих блиску астероїда, одержаних протягом достатньо великого відрізка часу. Необхідно відзначити, що одержувана крива блиску підозрюваного на подвійність об'єкта є суперпозицією періодичних функцій, пов'язаних як з осьовим обертанням головного тіла і його супутника, так і з орбітальним рухом супутника. Отже, спочатку виділяється крива блиску основного компонента астероїда з періодом P_1 . Надалі віднімання її зі складених кривих блиску дає залишкові варіації блиску, пов'язані з періодичністю обертання супутника та зі спільними

явищами покриття/затемнення, що формують довгоперіодичну криву блиску з періодом $P_{\text{орб}}$. Форма і глибина мінімумів орбітальної кривої залежить від того, часткове затемнення або повне, та визначаються співвідношенням діаметрів D_2/D_1 компонентів подвійної системи.

Третій підрозділ присвячений опису методів та результатів визначення таких фізичних параметрів астероїдів, як показники кольору і абсолютна зоряна величина, діаметр та альbedo, а також їх взаємних зв'язків між собою. Наприклад, зіставлення показників кольору (колор-індексів) з альbedo їх поверхонь дає уявлення про відмінності в складі поверхонь малих тіл і це було покладено в основу класифікації астероїдів за типами поверхні. В той же час, радіометричний метод визначення альbedo та діаметрів базується на вимірах візуального блиску астероїда в смузі V і його теплового випромінювання в інфрачервоному діапазоні. Отже, для коректного аналізу даних інфрачервоних вимірювань альbedo і діаметрів астероїдів і уточнення цих параметрів є необхідними сучасні і більш точні фотометричні значення абсолютних зоряних величин астероїдів.

У першому та другому підрозділах розділу 2 «Апаратура та методика ПЗЗ-фотометрії» розглянуто: апаратуру, що використовувалася під час спостережень; методику ПЗЗ-спостережень; редукцію ПЗЗ-зображень; апертурну фотометрію.

Весь масив даних був одержаний на 70-см телескопі АЗТ-8 НДІ астрономії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна (Чугуївська спостережна станція). Використовувалася система Ньютона з відносним отвором 1:4 і полем зору 40'. В якості приймача випромінювання застосовувалися прилади із зарядним зв'язком (ПЗЗ-камери) фірми FLI *Finger Lake Instrumental Corporation* (США) – IMG 1024S і IMG 47-10 (основні параметри ПЗЗ-камер див. у табл. 1).

Таблиця 1

Параметри ПЗЗ-камер, що використовувались для спостережень

ПЗЗ-камера	<i>IMG 1024S</i>	<i>IMG 47-10</i>
Квантова ефективність, %	82	93
Розмір у пікселях	1024×1024	1056×1027
Лінійний розмір пікселя, мкм	24×24	13×13
Поле зору, кут. хв.	30×30	16.9×16.4

Для проведення стандартизованих фотометричних спостережень ПЗЗ-камери забезпечені фільтровою туреллю з п'ятьма віконцями для світлофільтрів, що відповідають *UBVRI*-смунам фотометричної системи Джонсона–Козінса. Зареєстровані ПЗЗ-зображення є двовимірними масивами даних 1024 × 1024 елементів і займають 2 Мбайт дискового простору. Фотометричні вимірювання отриманих астрономічних зображень в подальшому проводяться за допомогою комп'ютера і відповідного програмного забезпечення.

В другому підрозділі описано методику ПЗЗ-спостережень та подальшу редукцію первинних ПЗЗ-зображень. Точність фотометричних вимірів астрономічних об'єктів багато в чому визначається характеристиками використовуваної ПЗЗ-камери, зокрема її власними шумами – тепловим і шумом зчитування.

Процес редукції включає процедуру віднімання від зареєстрованого зображення усереднених теплових (одержуваних окремо з тією ж експозицією і при тій же температурі) шумів і шумів зчитування, що призводить до істотного зниження цих шумів у порівнянні з початковим рівнем. Крім того, проводиться редукція зображень за нерівномірність чутливості пікселів ПЗЗ-матриці. При цьому кожне зареєстроване зображення ділиться на усереднене зображення плоского поля, що одержується рівномірною освітленістю матриці сутінковим світінням вечірнього або вранішнього неба.

Всі етапи первинної редукції зображень, а також фотометричні вимірювання зображень астероїда і зір порівняння проводились за допомогою пакета програмного забезпечення "ASTPHOT", розробленого С. Моттола [47]. Після всіх етапів редукції, виправлені відліки для об'єкта і зір порівняння переводяться в шкалу зоряних величин. Потім обчислюються різниці між блиском астероїда і блиском кожної з зір порівняння. Масив різниць блиску астероїд мінус зоря порівняння для серії зареєстрованих зображень і дає нам криву блиску астероїда в відносних зоряних величинах.

У першому підрозділі розділу 3 «Виявлення кратних систем серед малих астероїдів головного поясу та визначення їх параметрів» наведені відомості про методику визначення параметрів подвійних систем астероїдів та стратегію виявлення асинхронних подвійних астероїдів. Перш за все, складені криві блиску подвійної системи містять в собі кілька періодів – це періоди обертання P_1 та P_2 окремих компонентів подвійної системи, а також орбітальний період P_{orb} . Саме нерегулярна форма спостережуваних кривих блиску, що обумовлена взаємодією зазначених періодичностей, дає привід запідозрити цей астероїд у подвійності. Тому, використовуючи ділянки складених кривих блиску без нерегулярних депресій і послаблень блиску, спочатку отримуємо короткоперіодичну криву блиску, що характеризує осьове обертання основного тіла з періодом P_1 . Опісля віднімання її зі складених кривих блиску є залишкові варіації блиску, пов'язані з осьовим обертанням супутника P_2 та спільними явищами покриття/затемнення, що формують так звану довгоперіодичну криву блиску з періодом P_{orb} .

Величина глибини падіння блиску Δm на складеній кривій під час події, коли більше тіло затуляє менше, буде визначатися співвідношенням видимих площ компонентів, тобто співвідношенням квадратів їх діаметрів: $\Delta m = 2.5 \log(1 + k^2)$, де $k = D_2/D_1$ – співвідношення діаметрів, а D_1 і D_2 – середні проекції діаметрів головного тіла та його супутника. Необхідно відзначити, що для подвійної системи, у якій розміри компонентів однакові (тобто $D_2/D_1 = 1$), максимальна амплітуда $\Delta m = 0.75^m$. З іншого боку, точність фотометричних вимірів буде накладати обмеження на мінімальну величину співвідношення діаметрів у подвійній системі, яке можна виявити фотометричним методом. При точності фотометрії $\pm 0.03^m$ можна ототожнити подвійність за співвідношенням діаметрів $D_2/D_1 \geq 0.17$.

Насамкінець, про стратегію виявлення асинхронних подвійних астероїдів. Як показують фотометричні спостереження подвійних АЗЗ [53], для більшості асинхронних подвійних астероїдів значення періодів обертання основного тіла P_1 лежать у досить вузькому діапазоні $P_1 \sim 3 - 5 \text{ год}$. Ця особливість може бути

використана для виявлення нових подвійних систем фотометричним методом і серед астероїдів головного поясу. Тому пошук нових асинхронних подвійних систем астероїдів фотометричним методом можна формалізувати поетапним підходом: 1-й етап: у початковий період протягом 2–3 ночей отримуємо якомога довші ряди фотометричних спостережень досліджуваного об'єкта з тим, щоб покрити максимально його криву блиску і оцінити період обертання і амплітуду кривої блиску; 2-й етап: у разі короткого періоду обертання астероїда ($P_1 \sim 3 - 5 \text{ год}$) в наступні ночі проводимо фотометричні спостереження з метою виявлення моментів взаємних подій подвійної системи і можливого виявлення періоду обертання другого тіла; 3-й етап: у разі виявлення моментів взаємних подій у подвійній системі тіл, необхідно максимально охопити спостереженнями інтервал передбачуваного значення орбітального періоду $P_{\text{орб}}$ системи з тим, щоб переконатися, що ця величина є єдиним рішенням для цієї системи.

Отже, фотометричний метод виявлення подвійності астероїдів вимагає тривалих рядів спостережень досліджуваного об'єкта з одного боку, а з іншого – високої точності вимірювань. Тому завдання виявлення подвійності конкретного астероїда фотометричним методом на окремо взятому наземному телескопі стає не завжди здійсненним, особливо з урахуванням погодних умов. Безумовно, більш успішним рішенням можуть бути тривалі ряди фотометричних спостережень, що виконуються на різних телескопах у межах кооперативних зусиль багатьох спостерігачів з різних обсерваторій, розташованих на різних довготах. Таке завдання вирішує Міжнародна програма з виявлення малих подвійних астероїдів фотометричним методом BinAstPhotSurvey [50], яку координує з 2005 р. П. Правец (Чехія) (<http://www.asu.cas.cz/~ppravec/neo.htm>).

У другому підрозділі наведено основні результати виявлення подвійності та визначення параметрів кратних систем серед астероїдів головного поясу, одержані автором. Об'єктами цих досліджень є малі астероїди внутрішнього краю головного поясу з піввіссю орбіти $a < 2.5 \text{ a.o.}$ і діаметром $D \leq 15 \text{ км}$ (для яких абсолютна зоряна величина $H \geq 12^m$). Спостереження таких об'єктів проводилися в період їх сприятливої видимості протягом 1-2 місяців поблизу протистояння. При необхідності достовірного підтвердження факту виявлення подвійності і більш точного визначення параметрів подвійної системи спостереження продовжувалися більш тривалий час, включаючи і наступні протистояння. Необхідна точність фотометричних спостережень становила в середньому близько $0.01^m - 0.02^m$, але в жодному разі не гірше 0.03^m . Нижче наводяться деякі найважливіші результати для окремих астероїдів, що одержані у межах цієї роботи.

Асинхронні подвійні та потрійні системи:

2343 Siding Spring. Перші фотометричні спостереження цього астероїда були проведені в жовтні–грудні 2015 р. Наші дані отримано протягом чотирьох спостережних ночей. Видимий блиск даного астероїда в цей період був в межах $14.4^m - 15.8^m$. Криві блиску, які отримані автором (див. рис. 1), демонструють наявність періодичності основного тіла P_1 та присутність явно виражених подій покриття/затемнення (моменти початку і кінця подій відзначено стрілками). Тренд блиску на рис. 1a (пунктирні лінії) є проявом періодичності P_2 .

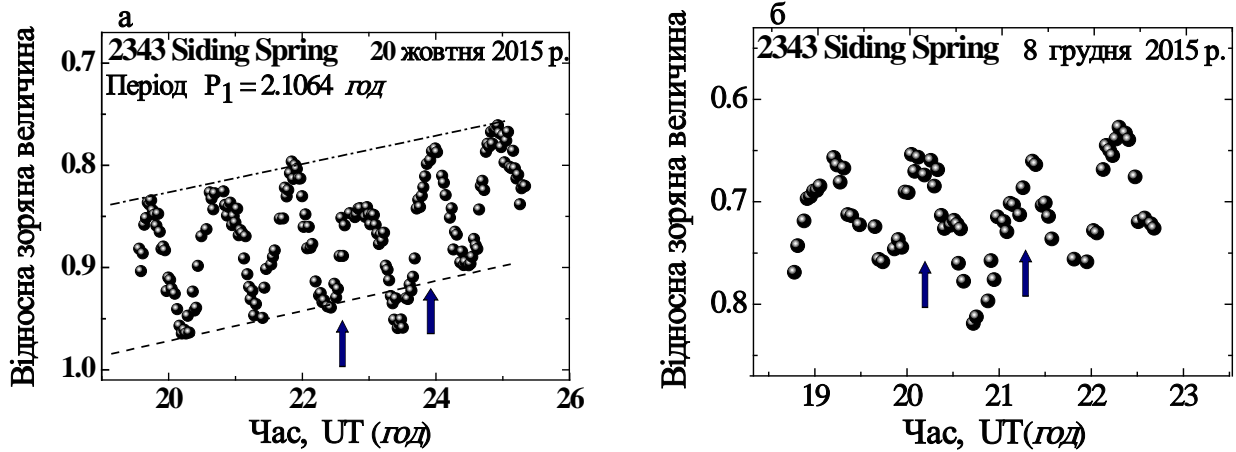


Рис. 1. Крива блиску астероїда 2343 Siding Spring за 20 жовтня 2015 р. (а) та за 8 грудня 2015 р. (б).

В результаті проведених фотометричних спостережень була виявлена подвійність астероїда 2343 Siding Spring і визначено орбітальний період системи $P_{\text{орб}} = 11.789 \pm 0.003 \text{ год}$. Величина падіння блиску цього астероїда у момент покриття супутника основним тілом $\Delta m = 0.04^{\text{m}} - 0.06^{\text{m}}$ (див. рис. 1а, момент події) вказує на те, що нижня межа співвідношення середніх діаметрів компонентів $D_2/D_1 \geq 0.19$ [23]. За отриманими даними, період обертання основного компонента астероїда 2343 Siding Spring становить $P_1 = 2.10637 \pm 0.00008 \text{ год}$, а амплітуда варіацій блиску – близько 0.15^{m} , що передбачає слабо подовжену форму основного тіла. Другий компонент цієї пари має несинхронізоване обертання з періодом $P_2 = 20.01 \pm 0.03 \text{ год}$ і амплітудою варіацій блиску близько 0.04^{m} [23].

Аналіз всіх кооперативних даних фотометричних спостережень подвійного астероїда 2343 Siding Spring також показує, що після віднімання кривих блиску основного і другого компонента залишаються додаткові варіації блиску, які можуть бути наслідком наявності третього тіла в системі. Для визначення і уточнення всіх параметрів цієї потрійної системи потрібні подальші фотометричні спостереження в наступні протистояння.

5112 Kusaĵi

Фотометричні спостереження астероїда головного поясу 5112 Kusaĵi були виконані автором в жовтні–листопаді 2016 р. протягом 5 ночей. Видимий блиск астероїда в цей період був у межах $15.7^{\text{m}} - 15.9^{\text{m}}$. Уже перша крива блиску астероїда 5112 Kusaĵi, що отримана 24 жовтня 2016 р., демонструє періодичність з максимальною амплітудою 0.12^{m} і коротким періодом $P_1 = 2.799 \text{ год}$. Спостереження в наступні дві ночі 25 і 26 жовтня, поряд з періодичністю P_1 , виявили характерний для кривої блиску подвійного астероїда тренд блиску (див. на рис. 2 – штрихові лінії) та присутність на кривих блиску явно вираженої події покриття/затемнення двох тіл (початок і кінець події позначено стрілками). Аналіз цих фотометричних даних показує, що астероїд 5112 Kusaĵi є подвійною системою тіл з орбітальним періодом $P_{\text{орб}} = 20.74 \pm 0.01 \text{ год}$ [24].

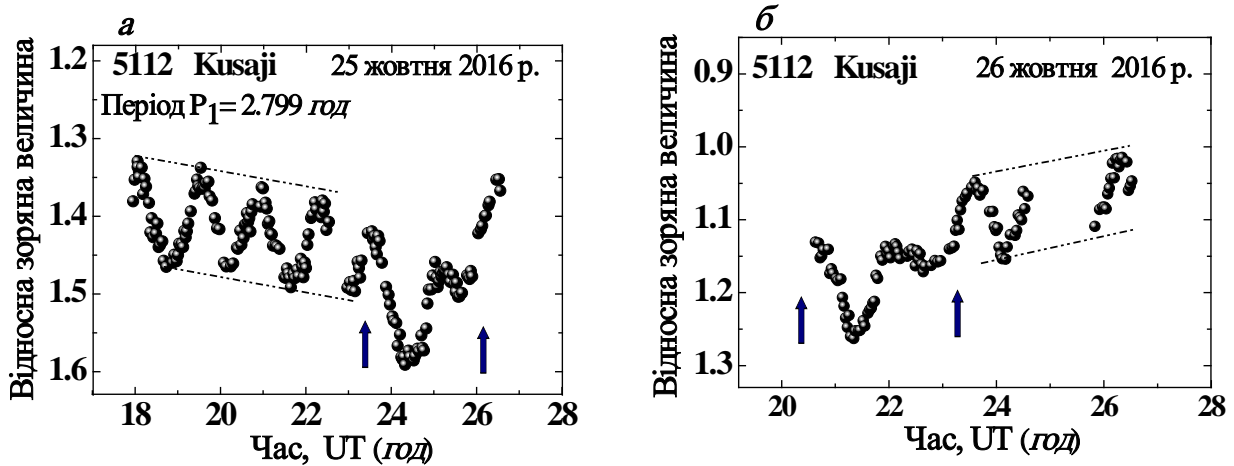


Рис. 2. Крива блиску астероїда 5112 Kusaĵi за 25 (а) та 26 (б) жовтня 2016 р..

Величина падіння блиску астероїда в момент покриття/затемнення супутника основним тілом дорівнює $\Delta m = 0.10^m - 0.16^m$, що відповідає нижній межі співвідношення середніх діаметрів компонентів $D_2/D_1 \geq 0.31 \pm 0.02$ [24].

Аналіз колективних спостережень подвійного астероїда 5112 Kusaĵi виявив, що обертання супутника синхронізовано з орбітальним рухом і має амплітуду $A_2 = 0.02^m - 0.03^m$ [24] в спільній (основне тіло + супутник) кривій блиску.

8306 Shoko

Фотометричні спостереження малого астероїда 8306 Shoko були проведені автором протягом 7 спостережних ночей у вересні–жовтні 2013 р. Видимий блиск астероїда в цей період був у межах $15.8^m - 16.8^m$. Вже перші криві блиску астероїда з амплітудою 0.12^m , отримані у вересні, дають можливість визначити період обертання цього астероїда $P_1 = 3.35035$ год, а також продемонстрували свою незвичність – на кривих блиску явно помітний тренд середнього блиску протягом однієї ночі. Причому спрямованість цього тренду змінюється від ночі до ночі (див. рис. 3а і 3б, на яких середній рівень блиску астероїда позначено штриховою лінією). Як вже зазначалося вище, така поведінка фотометричних кривих блиску астероїда може бути пояснена його подвійністю.

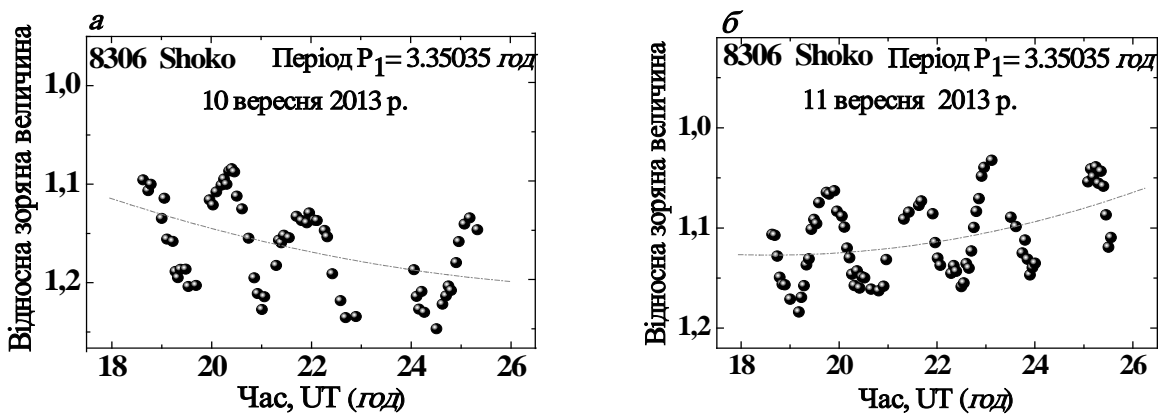


Рис. 3. Криві блиску астероїда 8306 Shoko за 10 (а) та 11 (б) вересня 2013 р.

Подальші фотометричні спостереження зафіксували взаємні події в системі

астероїда 8306 Shoko з орбітальним періодом $P_{\text{орб}} = 36.20 \text{ год}$ [18]. На рис. 4 наведені наші фотометричні дані для астероїда 8306 Shoko, побудовані з цим орбітальним періодом. На рисунку чітко проявляються глибокі мінімуми – моменти взаємних подій в подвійній системі, а також помітні коливання середнього блиску астероїда на інтервалі орбітального періоду. Величина падіння блиску астероїда в момент покриття супутника основним тілом ($\Delta m = 0.26^m$) вказує на те, що нижня межа співвідношення середніх діаметрів компонентів $D_2/D_1 \geq 0.40$. Другий компонент цієї пари має синхронізоване обертання з періодом, що дорівнює орбітальному $P_2 = P_{\text{орб}} = 36.20 \text{ год}$ [18].

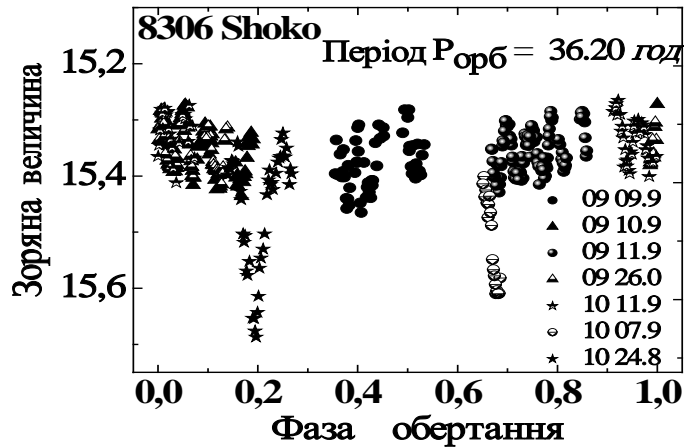


Рис. 4. Складена крива блиску астероїда 8306 Shoko, побудована з періодом $P_{\text{орб}} = 36.20 \text{ год}$ за спостереженнями автора в 2013 р.

Аналіз кооперативних фотометричних спостережень астероїда 8306 Shoko в 2013 р. показує, що після виокремлення кривих блиску обох тіл залишаються додаткові варіації блиску, які можуть вказувати на наявність третього тіла в даній системі. Імовірно, що період обертання третього тіла P_3 близько 61 год [8], але це потребує подальшого підтвердження. Таким чином, астероїд 8306 Shoko є потрійною системою з синхронним внутрішнім і асинхронним зовнішнім супутником.

Повністю синхронна подвійна система астероїда 8474 Rettig

Фотометричні спостереження астероїда головного поясу 8474 Rettig були проведені автором в травні–липні 2015 р. протягом 7 ночей. Видимий блиск астероїда у цей період був у межах $15.8^m - 16.6^m$. Вже перша крива блиску, що була отримана 19 травня 2015 р., демонструє дуже швидке падіння блиску астероїда на величину $\Delta m \sim 0.6^m$ протягом 1.5 год, що виглядає аналогічно явищу взаємного покриття/затемнення в подвійній системі (див. рис. 5a).

Подальші наші фотометричні спостереження астероїда 8474 Rettig у червні–липні 2015 р. дали можливість виявити обидва мінімуми орбітальної кривої та визначити орбітальний період $P_{\text{орб}} = 30.54 \text{ год}$ цієї подвійної системи [21]. За цими даними, глибина падіння блиску Δm у моменти взаємних явищ ($\sim 0.60^m - 0.93^m$) вказує на нижню межу співвідношення діаметрів компонентів системи величиною $D_2/D_1 \geq 0.86$, тобто тіла в цій подвійній системі майже однакового розміру.

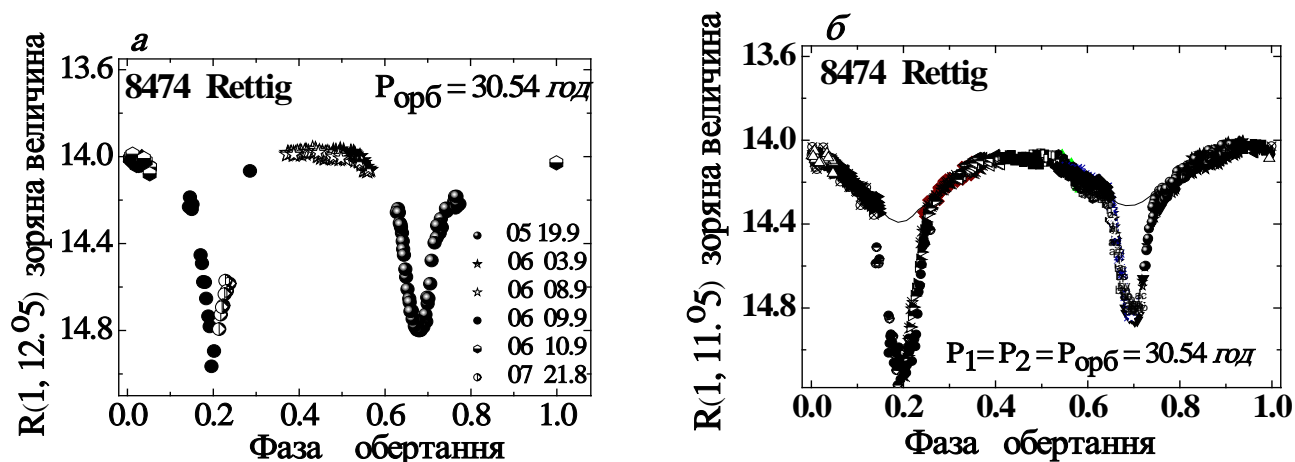


Рис. 5. Крива блиску астероїда 8474 Rettig: за спостереженнями автора (а) та складена крива блиску за кооперативними спостереженнями в 2015 р. (б) (<http://www.asu.cas.cz/~ppravec>).

Аналіз кооперативних даних (див. рис. 5б) виявив, що астероїд 8474 Rettig є повністю синхронною системою двох тіл, тобто обертання компонентів синхронізовано з орбітальним періодом ($P_1 = P_2 = P_{\text{орб}} = 30.54 \text{ год}$). Амплітуда ($A_1 + A_2$) комбінованої кривої блиску двох тіл (апроксимація синусоподібною лінією на рис. 5б) дорівнює 0.34^m [21].

На закінчення третього розділу наведено висновки, в яких вказано, що фотометричні спостереження астероїдів малих розмірів головного поясу з метою виявлення подвійності серед таких об'єктів привели до виявлення 19 нових кратних (подвійних і потрійних) систем астероїдів – 18 асинхронних і одної повністю синхронної пари астероїда 8474 Rettig. Детальні фотометричні спостереження нових виявлених кратних систем з точністю вимірювань $0.01^m - 0.02^m$ дали можливість визначити параметри цих систем – орбітальний період $P_{\text{орб}}$, періоди обертання окремих компонентів P_1 і P_2 і амплітуди їх кривих блиску A_1 та A_2 , а також співвідношення діаметрів компонентів D_2/D_1 . Всі ці параметри приведено нижче при аналізі результатів у розділі 5, таблиця 2.

В розділі 4 «Відносна та абсолютна фотометрія окремих астероїдів малих розмірів головного поясу» описано методику стандартизації фотометричних спостережень малих астероїдів та результати абсолютної фотометрії окремих астероїдів.

Процедура фотометричних вимірювань астероїда передбачає порівняння його блиску з блиском зір (зір порівняння), зареєстрованих на тому ж ПЗЗ-зображенні. Це – так звана, диференційна або відносна фотометрія. У свою чергу, абсолютна фотометрія передбачає також отримання знімків зоряних полів з фотометричними стандартами (зорями з відомим блиском у стандартній фотометричній системі), які знаходяться поблизу області спостереження астероїда (не далі 3–5 град).

Стандартизація фотометричних вимірювань астероїда проводилася тільки в ночі з гарною якістю зображення (фотометричні ночі) методом рівних висот. На першому етапі проводиться стандартизація зір порівняння, а потім, з вико-

ристанням диференціальної фотометрії (тобто відносних фотометричних вимірювань астероїда і вторинних стандартів) отримуємо стандартизовані фотометричні вимірювання астероїда в обраних смугах системи Джонсона–Козінса. Для стандартизації спостережень астероїдів використовувалися каталоги зір-стандартів LONEOS (<ftp://ftp.lowell.edu/pub/bas/starcats/loneos.stds> або [The Guide Star Photometric Catalog, Version 2.4](#)). Як правило, внутрішня точність таких каталогів не гірше $\pm 0.01^m$. Відповідно, сумарна похибка стандартизації спостережуваних астероїдів, яка враховує похибки диференціальної фотометрії і абсолютного калібрування, в середньому становить $\pm 0.02^m - 0.03^m$.

Для коректного аналізу стандартизованих вимірювань астероїдів необхідний облік впливу фазової залежності блиску астероїда [41], тобто змін блиску, викликаних змінами геометрії освітлення і спостереження астероїда. У дисертаційній роботі використовується двопараметрична апроксимуюча *HG*-функція, що детально описана в роботі [37]. Відповідно до цієї функції, блиск астероїда для фазового кута α в стандартній смузі V , приведений до одиничних відстаней від Землі і Сонця, може бути обчислений за формулою:

$$H_V(1, \alpha) = H_V - 2.5 \log [(1-G) \Phi_1(\alpha) + G \Phi_2(\alpha)],$$

де H_V – абсолютна зоряна величина астероїда в V -смузі, параметр G характеризує нахил фазової залежності, а $\Phi_1(\alpha)$ і $\Phi_2(\alpha)$ – фазові функції. Для опису *HG*-функції були введені емпіричні залежності $\Phi_1(\alpha)$ і $\Phi_2(\alpha)$, параметри яких були обчислені за наявними в той час фазовими залежностями, переважно за фазовими залежностями астероїдів S-типу. Оскільки більшість описуваних нижче астероїдів було ідентифіковано як астероїди S-типу, то в більшості випадків використовується середнє значення параметра $G = 0.24 \pm 0.11$ для S-типу [56].

У припущенні, що тіло має сферичну форму, а геометричне альbedo поверхні в смузі V є p_V , його діаметр D в км можна обчислити за формулою [52]:

$$\log D(\text{км}) = 3.1235 - 0.2H_V - 0.5 \log(p_V) \quad (1)$$

Формула (1) часто використовується в цій роботі для оцінки діаметра або альbedo астероїдів, які вперше спостерігалися фотометричним методом.

В другому підрозділі приведені результати абсолютної фотометрії окремих астероїдів малих розмірів головного поясу. Основними об'єктами досліджень є астероїди внутрішньої частини головного поясу (велика піввісь орбіти яких $a < 2.5$ а.о.) та малих розмірів ($D < 15$ км), фотометричні спостереження яких раніше не проводилися. При цьому видимий блиск обраного об'єкта повинен бути достатнім для проведення ПЗЗ-спостережень з точністю не гірше $\pm 0.03^m$, тобто не слабкіше 17.0^m .

1344 Caubeta

Астероїд 1344 Caubeta (велика піввісь $a = 2.248$ а.о., нахил орбіти $i = 5.7^\circ$) належить до сімейства Флори [48]. Фотометричні спостереження цього астероїда вперше були проведені автором і іншими спостерігачами в березні 2009 р. [5] у межах кооперативної програми пошуку подвійності серед малих астероїдів головного поясу. Отримана крива блиску астероїда (див. рис. 6а) має симетричний вигляд та вказує на варіації блиску з періодом $P = 3.1221 \pm 0.0001$ год і

амплітудою $A = 0.22^m$ [5]. Слід відзначити, що на наведених нижче кривих блиску стандартизована зоряна величина спостережуваних астероїдів дана для кута фази α в смузі R і редукована до стандартної відстані від Землі і Сонця в 1 a.o.

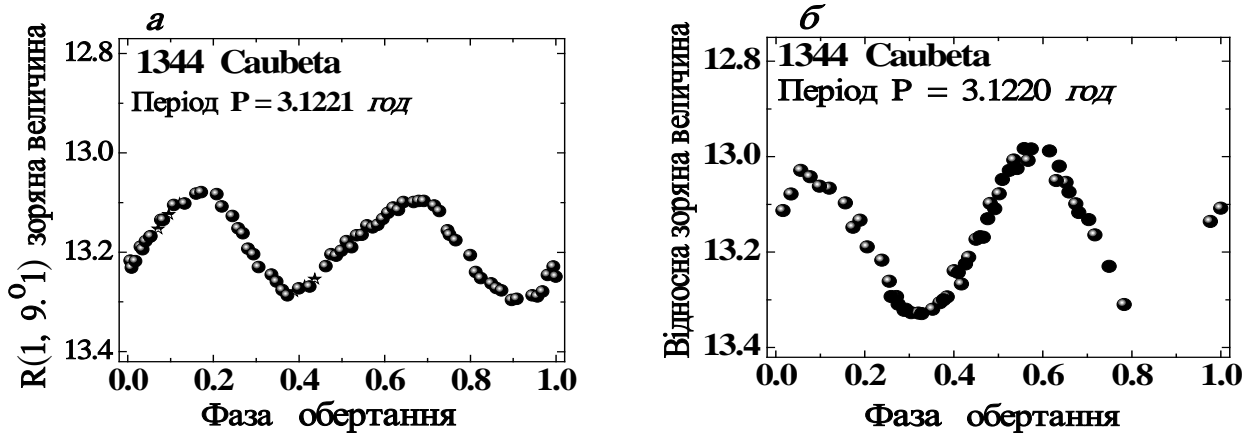


Рис. 6. Криві блиску астероїда 1344 Caubeta за 2009 р. (а) та за 2010 р. (б).

Наступного протистояння у вересні 2010 р. астероїд 1344 Caubeta знову став об'єктом фотометричних спостережень, які були проведені автором протягом 2 ночей. Складена крива блиску (див. рис. 6б) підтверджує отриманий вище період обертання астероїда $P = 3.1220 \pm 0.0002 \text{ год}$, але демонструє істотно більшу амплітуду величиною 0.38^m .

Процедура стандартизації отриманих фотометричних даних для астероїда 1344 Caubeta була виконана в 2009 р. у V і R стандартних смугах. Отримане значення колор-індексу $V - R = 0.51^m \pm 0.03^m$ є досить близьким до середнього значення для S-типу астероїдів [55]. Абсолютна зоряна величина цього астероїда, яка отримана з наших спостережень за 2009 р., дорівнює $H_V = 13.14^m \pm 0.08^m$. У припущенні середнього альбедо $p_V = 0.24 \pm 0.07$, характерного для астероїдів сімейства Флори [56], ефективний діаметр цього астероїда за нашими вимірами дорівнює $6.4 \pm 1.2 \text{ км}$ [5]. Використовуючи отриману нами абсолютну зоряну величину H_V і значення діаметра $D = 5.8 \pm 0.1 \text{ км}$, визначеного за спостереженнями WISE [45], можна отримати оцінку геометричного альбедо астероїда 1344 Caubeta, яке виявилось рівним $p_V = 0.29 \pm 0.04$. Альбедо цього астероїда за даними WISE $p_V = 0.3924 \pm 0.0275$ [45], що істотно вище за нашу оцінку.

4555 1987 QL

Фотометричні спостереження астероїда головного поясу 4555 1987 QL були проведені вперше в травні–червні 2007 р. Видимий блиск астероїда в цей період був в межах $15.5^m - 15.8^m$. На рис. 7а приведена складена крива блиску за спостереженнями автора, яка побудована з періодом $P = 2.8847 \pm 0.0001 \text{ год}$ та має максимальну амплітуду $A = 0.21^m$. Більшість кооперативних фотометричних спостережень астероїда 4555 1987 QL, виконаних у 2007 р., були стандартизовані, що дало можливість отримати фазову залежність блиску астероїда в діапазоні фазових кутів $8.4^\circ - 15.0^\circ$ (див. рис. 7б) і провести її апроксимацію HG -функцією, яка дає значення $H_R = 13.70 \pm 0.03^m$ і $G = 0.186 \pm 0.038$ [5].

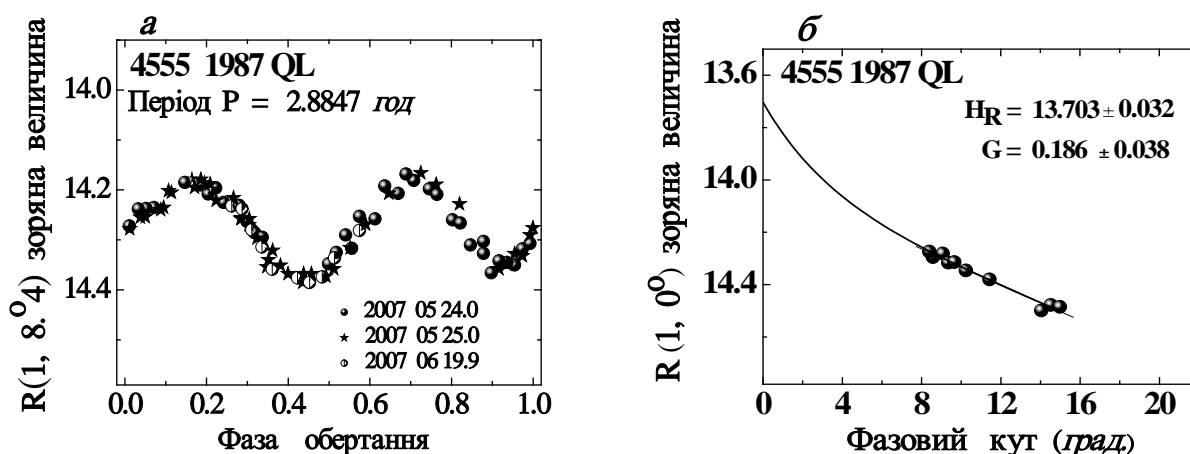


Рис. 7. Крива блиску астероїда 4555 1987 QL (а) та фазова залежність цього астероїда і її апроксимація HG -функцією (б).

Стандартизація наших спостережень була виконана в V і R смугах, отриманий показник кольору становить $V - R = 0.44^m \pm 0.03^m$. Абсолютна зоряна величина H_V астероїда 4555 1987 QL за нашими вимірами дорівнює $H_V = 14.14^m \pm 0.05^m$, а його діаметр $D = 4.0 \pm 0.6$ км з використанням передбачуваного середнього альбедо $p_v = 0.24 \pm 0.04$ [5]. Використовуючи значення ефективного діаметра астероїда за спостереженнями WISE ($D = 3.2 \pm 0.1$ км), отримуємо нову оцінку його геометричного альбедо $p_v = 0.40 \pm 0.04$, що практично збігається з альбедо за даними WISE [45].

9425 Marconcini

Фотометричні спостереження астероїда 9425 Marconcini вперше були виконані автором у вересні–жовтні 2012 р. протягом п'яти ночей. Ефемеридна видима зоряна величина об'єкта при цьому була в діапазоні $15.3^m - 15.8^m$. Складена крива блиску цього астероїда приведена на рис. 8. Вона побудована з періодом $P = 3.0698 \pm 0.0002$ год та має максимальну амплітуду 0.18^m [35].

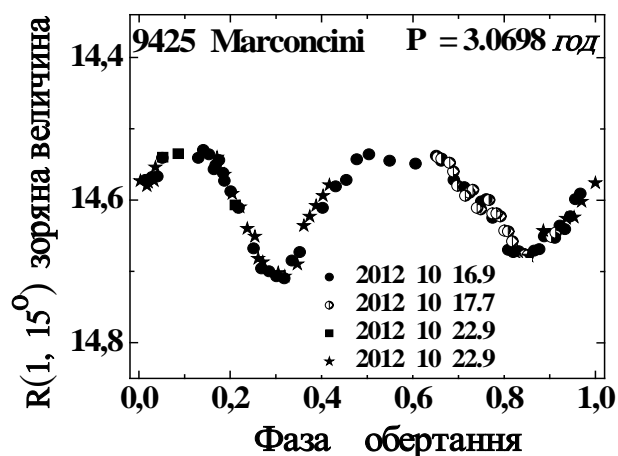


Рис. 8. Складена крива блиску астероїда 9425 Marconcini.

Фотометричні спостереження астероїда 9425 Marconcini за 22 жовтня 2012 р. стандартизовані в смугах V і R . Значення показника кольору $V - R = 0.54^m \pm 0.03^m$,

що досить близько до середнього значення для астероїдів S-типу. Отримана абсолютна зоряна величина астероїда дорівнює $H_V = 14.42^m \pm 0.09^m$ [35]. Використовуючи дане значення H_V і значення ефективного діаметра цього астероїда $D = 4.1 \pm 0.2$ км з інфрачервоних спостережень WISE [45], отримуємо значення геометричного альбедо цього астероїда $p_v = 0.18 \pm 0.03$. Альбедо за даними WISE $p_v = 0.27 \pm 0.04$ [45], що значно вище за нашу оцінку.

Розділ 5 «Аналіз отриманих результатів».

Одним із результатів проведених фотометричних спостережень в дисертаційній роботі є визначення періодів осьового обертання для 76 астероїдів головного поясу невеликих розмірів (див. табл. В.1 в додатку дисертації). Аналіз цих даних показує, що значення періодів обертання укладені в широкому діапазоні від $P = 2.1$ год (астероїд 2343 Siding Spring) до величини $P \approx 200.0$ год (астероїд 43904 1995 WO). На рис. 9а показаний розподіл 76 астероїдів нашої вибірки за швидкостями обертання залежно від їх розміру. Однак в цій вибірці присутня селекція, що пов'язана з виявленими асинхронними кратними системами, для яких періоди обертання основних тіл знаходяться в діапазоні $\sim 2\text{--}3$ год.

Більш повними та менше спотвореними спостережною селекцією є дані про швидкості обертання малих астероїдів головного поясу, що отримані завдяки кооперативним фотометричним спостереженням астероїдів у межах Міжнародної програми BinAstPhotSurvey [4, 50], учасником якої є автор. На рис. 9б наведено розподіл 580 астероїдів малих розмірів головного поясу за швидкостями обертання ω (об/добу), побудований автором за даними цієї програми, одержаними в період з 2005 р. по квітень 2017 р. (www.asu.cas.cz/~ppravec/). При цьому, виявлені кратні системи малих астероїдів виключено з розгляду. Цей розподіл виявився порівняно плоским у діапазоні $\omega = 1\text{--}10$ об/добу і відрізняється від майже максвеллівського розподілу для великих астероїдів $D > 40$ км [51].

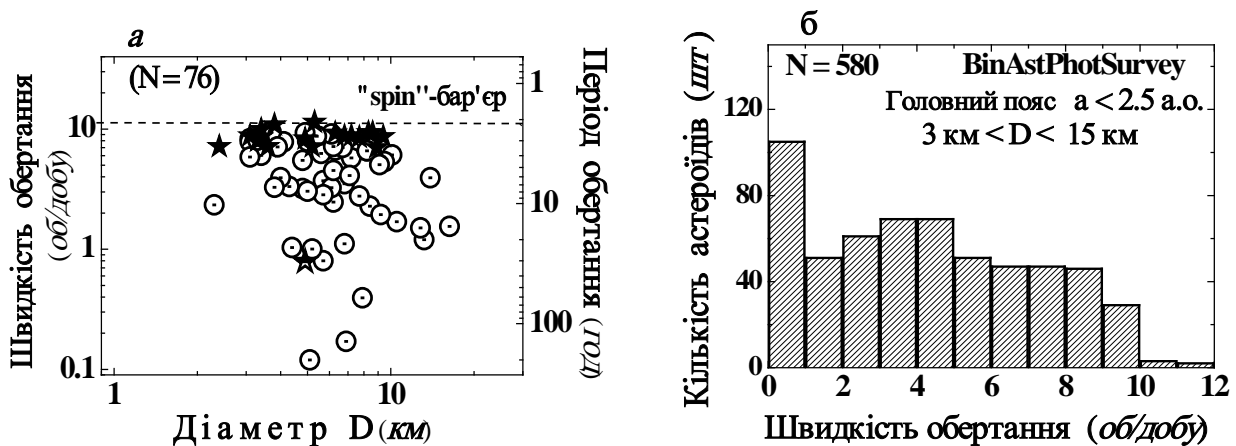


Рис. 9. а) Діаграма швидкості обертання – діаметр для 76 астероїдів. Зірочками позначені виявлені кратні системи. Штрихова лінія означає межу швидкості обертання для слабо консолідованих тіл типу «купа каміння» [42]; б) Гістограма розподілу 580 астероїдів малих розмірів головного поясу за швидкостями обертання (пояснення в тексті).

В той же час, для розподілу АЗЗ за швидкостями обертання характерна наявність відносних надлишків астероїдів із швидким і повільним обертанням [4; 44], обумовлених (як було показано в цих роботах) впливом YORP-ефекту [54]. Розподіл на рис. 9б теж має ознаки зазначених надлишків. Тому для більш детального вивчення питання про вплив YORP-ефекту, автором були побудовані розподіли за швидкостями обертання астероїдів з діаметрами $D = 3\text{--}15$ км головного поясу за всіма наявними даними на квітень 2017 р. [56, Update 2017; <http://www.MinorPlanet.info/lightcurvedatabase.htm>].

На рис. 10 представлені отримані розподіли малих астероїдів за швидкостями обертання окремо для зовнішньої частини (зліва) головного поясу ($a > 2.6$ а.о.) і для внутрішньої частини ($a < 2.6$ а.о.) – праворуч .

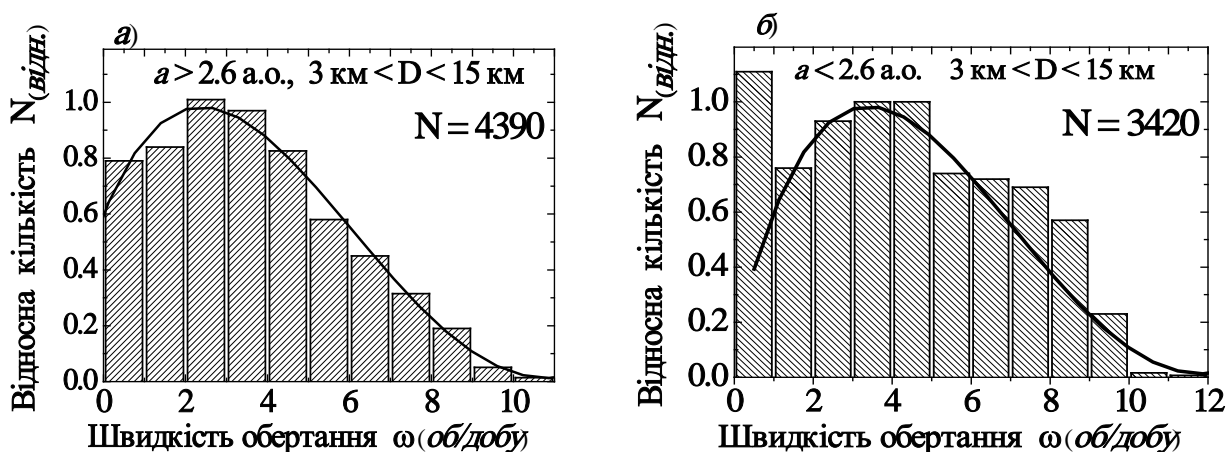


Рис. 10. Розподіли астероїдів за швидкостями обертання для зовнішньої (а) і внутрішньої частини (б) головного поясу. Крива лінія – апроксимація першого розподілу ($a > 2.6$ а.о.) поліномом 4-го степеня.

Порівняння отриманих розподілів чітко показує наявність на розподілі для астероїдів внутрішньої частини поясу (див. рис. 10б) двох відносних надлишків астероїдів, що повільно ($\omega < 1$ об/добу) та швидко ($\omega > 7$ об/добу) обертаються. Підкреслимо, що це надлишки розподілу для астероїдів внутрішньої частини головного поясу відносно розподілу для зовнішньої частини.

Аналогічні надлишки в розподілі АЗЗ за швидкостями пояснюються [44] впливом на їх обертання YORP-ефекту, який проявляється в зміні швидкості обертання і орієнтації осі обертання в просторі для малих астероїдів неправильної форми під дією сонячного випромінювання [36]. Важливим є те, що приріст кутового моменту в залежності від напрямку обертання астероїда (тобто вектора кутової швидкості) може бути як позитивним, так і негативним. Саме тому в результаті дії YORP-ефекту формуються надлишки астероїдів як з швидким, так і з повільним обертанням. Відомо, що дія цього ефекту залежить не тільки від розміру астероїда і його форми, а й від кількості сонячного випромінювання, одержуваного тілом. Тому цілком природно, що дія ефекту буде більш виражена в розподілі за швидкостями обертання астероїдів внутрішньої частини головного поясу (див. рис. 10б), де інсоляція приблизно в 1.5 рази вище, ніж у зовнішній.

Дуже важливими результатами фотометричних спостережень у дисерта-

ційній роботі є виявлення подвійних і потрійних систем серед астероїдів малих розмірів головного поясу та визначення їх параметрів. Другий підрозділ присвячений аналізу параметрів виявлених кратних систем та опису найбільш вірогідного механізму виникнення таких систем.

Список виявлених за участю автора подвійних і потрійних астероїдів (див. табл. 2) включає 20 об'єктів – 18 асинхронних і одна повністю синхронна система астероїда 8474 Rettig, а також один найбільш ймовірний кандидат на подвійність – астероїд 15700 1987 QD. У таблиці наведено визначені параметри виявлених кратних систем: період обертання P_1 і амплітуда кривої блиску A_1 основного компонента, орбітальний період $P_{\text{орб}}$, співвідношення діаметрів компонентів D_2/D_1 , а також період обертання P_2 і амплітуда кривої блиску A_2 другого компонента.

Таблиця 2

Параметри виявлених в цій роботі кратних систем астероїдів

Астероїд	P_1 год	A_1 зор.вел.	$P_{\text{орб}}$ год	D_2/D_1	P_2 год	A_2 зор.вел.	Примітки
1830 Pogson	2.57010	0.10	24.2458	0.30	3.2621	0.04	<u>Потрійний</u>
2131 Mayall	2.5678	0.09	23.48	0.28	23.47	0.04	Подвійний
2343 Siding Spring	2.1063	0.15	11.789	>0.19	20.01	0.04	<u>Потрійний</u>
2623 Zech	2.7401	0.22	117.2	>0.29	18.718	0.08	Подвійний
2815 Soma	2.33325	0.08	17.915	0.25	–	–	Подвійний
3868 Mendoza	2.77082	0.09	12.19	0.17	–	–	Подвійний
4272 Entsuji	2.8087	0.06	15.945	0.18	–	–	Подвійний
4514 Vilen	2.89224	0.09	16.85	>0.26	–	–	Подвійний
5112 Kusaji	2.7995	0.11	20.74	0.31	20.74	0.03	Подвійний
5872 Sugano	2.3642	0.11	18.04	>0.30	–	–	Подвійний
7344 Summerfield	2.58975	0.17	17.41	0.18	–	–	Подвійний
8306 Shoko	3.3503	0.11	36.2	0.45	36.2	0.05	<u>Потрійний</u>
9972 Minoruoda	3.4221	0.11	22.89	>0.24	–	–	Подвійний
10208 1997 QN1	3.3484	0.13	58.55	0.46	–	–	Подвійний
12326 Shirasaki	2.7286	0.12	25.06	>0.24	12.7	0.04	Потрійн. ?
15268 Wendelinef.	2.4224	0.07	25.07	>0.27	–	–	Подвійний
15700 1987 QD	3.0586	0.07	62.9 ?	–	–	–	Канд. подв.
16635 1993 QO	2.20838	0.18	32.25	0.35	32.25	0.03	<u>Потрійний</u>
32008 2000 HM53	3.071	0.19	40.24	>0.40	–	–	Подвійний
8474 Rettig	30.54	0.34*	30.54	>0.86	30.54	0.34*	Синхрон.

* – сумарна амплітуда $A_1 + A_2$

Аналізуючи таблицю 2, можна помітити, що характерними особливостями асинхронних кратних систем, виявлених у цій роботі є:

а) короткий період обертання основного компонента в діапазоні $P_1 = 2.10 \div 3.42 \text{ год}$, при цьому мінімальні значення досить близькі до межі швидкості обертання слабо консолідованих тіл типу «купа каміння» [42];

б) невеликі значення амплітуд кривих блиску основного компонента ($A_1 = 0.06 - 0.19^m$), що вказує на його майже сферичну або слабо видовжену форму;

в) значення співвідношення діаметрів компонентів знаходяться в межах $0.17 < D_2/D_1 < 0.46$. При цьому мінімальне значення співвідношення обмежено точністю кооперативних фотометричних вимірювань $\pm 0.03^m$.

Кратні системи астероїдів 2343 Siding Spring і 2623 Zech є найтіснішою і найширшою парами, тобто системами з мінімальним і максимальним орбітальним періодом відповідно. Асинхронна система астероїда 2343 Siding Spring має найкоротший орбітальний період $P_{\text{орб}} = 11.789 \pm 0.003 \text{ год}$, і це говорить про тісну систему тіл з орбітою супутника, близькою до межі Роша. У той же час подвійний астероїд 2623 Zech має асинхронний супутник, що знаходиться на дуже далекій орбіті з орбітальним періодом $P_{\text{орб}} = 117.2 \pm 0.3 \text{ год}$ [8, 19].

Супутники астероїдів в асинхронних системах можуть мати як синхронізоване обертання з орбітальним, коли $P_2 = P_{\text{орб}}$ (2131 Mayall, 5112 Kusaji, 8306 Shoko і 16635 1993 QO), так і асинхронне обертання, що не співпадає з орбітальним (1830 Pogson, 2343 Siding Spring, 2623 Zech, 12326 Shirasaki).

Серед асинхронних кратних систем більшість становить подвійні системи і лише чотири потрійні – 1830 Pogson, 2343 Siding Spring, 8306 Shoko і 16635 1993 QO, а також ймовірна потрійна система астероїда 12326 Shirasaki. У всіх цих випадках у складених кривих блиску цих об'єктів є додатковий періодичний компонент, який не належить основному компоненту або його супутнику і не зникає в моменти спільних явищ покриттів/затемнень основного тіла і супутника, тим самим вказуючи на присутність в системі ще одного і, скоріш за все, зовнішнього супутника. Отже, у випадках 8306 Shoko і 16635 1993 QO – це потрійні системи астероїдів з синхронним внутрішнім супутником і асинхронним зовнішнім. У той же час астероїди 1830 Pogson і 2343 Siding Spring є потрійні системи з двома асинхронними (внутрішнім і зовнішнім) супутниками.

Серед виявлених в роботі кратних систем астероїдів малих розмірів є одна повністю синхронна система двох тіл астероїда 8474 Rettig [21] (докладніше в підрозділі 3.2.2 дисертації). До теперішнього часу відомо тільки 15 повністю синхронних подвійних астероїдів, в яких обидва компонента приблизно однакових розмірів ($D_2/D_1 > 0.8$) і з синхронним обертанням компонентів (тобто $P_1 = P_2 = P_{\text{орб}}$). У головному поясі виявлено 12 повністю синхронних подвійних астероїдів малих розмірів з діаметром D_1 від 3.5 км до 13 км [8].

Аналіз параметрів повністю синхронних подвійних астероїдів малих розмірів головного поясу показує, що величина співвідношення діаметрів D_2/D_1 змінюється в невеликому діапазоні від 0.7 (7369 Gavrilin) до 0.98 (854 Frostia) і з середнім значенням $D_2/D_1 = 0.87$. У той же час, діапазон орбітальних періодів досить широкий – від $P_{\text{орб}} = 15.4 \text{ год}$ (809 Lundia) до $P_{\text{орб}} = 118.0 \text{ год}$ (4951 Iwamoto).

Виявлена нами синхронна пара астероїда 8474 Rettig має параметри, типові

для цієї рідкісної популяції подвійних астероїдів – високе співвідношення діаметрів $D_2/D_1 \geq 0.86$ і синхронне обертання компонентів з орбітальним періодом $P_1 = P_2 = P_{\text{орб}} = 30.54 \text{ год}$ та порівняно невелику амплітуду комбінованої кривої блиску $A_1 + A_2 = 0.34$. За нашими оцінками, розміри компонентів D_1 і D_2 синхронної пари астероїда 8474 Rettig мінімальні серед всіх виявлених синхронних подвійних астероїдів головного поясу – це 3.5 км і 3.0 км відповідно.

Грунтуючись на аналізі спостережних кооперативних програм, які виконувались протягом останніх майже двох десятиріч, автор розглянув питання поширеності синхронних пар, і за його оцінкою кількість повністю синхронних подвійних пар серед астероїдів головного поясу малих розмірів складає ~2–3% від усієї кількості астероїдів. Ця оцінка збігається з оцінками теоретичної роботи [43], де поширеність повністю синхронних подвійних пар передбачається десь близько 2% від усієї кількості астероїдів.

Аналіз основних параметрів асинхронних подвійних і потрійних систем астероїдів невеликих розмірів головного поясу (див. вище табл. 2) – швидке обертання і майже сферичність або слабка подовженість основного тіла кратної системи – передбачає, що найбільш вірогідний механізм виникнення подвійності серед малих астероїдів головного поясу – це поділ швидкообертаючих тіл зі структурою «купа каміння» під впливом YORP-ефекту [8, 46, 52]. У міру все більшого розкручування такого астероїда форма його тіла стає все більш опуклою на екваторі за рахунок сповзання зовнішнього шару «купи каміння» з полюсів до екватора і появи екваторіальних хребтів [40]. При цьому астероїд втрачає свою масу, яка сповзає з екваторіального гребеня і піддається акреції в другий компонент на стабільній орбіті. За радарними спостереженнями [38, 49] подібний екваторіальний гребінь реально спостерігається на головних компонентах деяких кратних систем АЗЗ (див. рис. 11).

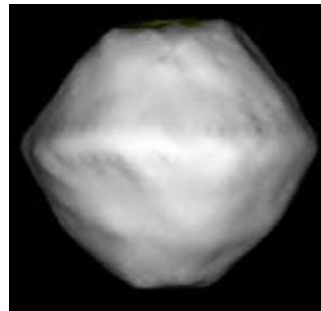
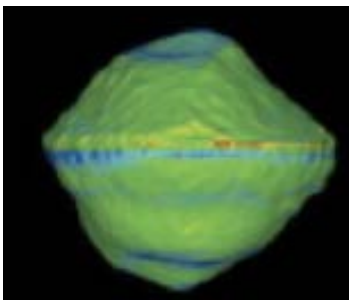


Рис. 11. Форма основного тіла подвійного астероїда 66391 1999KW4 [49] – зліва. Праворуч – форма основного тіла потрійного астероїда 136617 1994CC [38].

В заключному третьому підрозділі проведено аналіз результатів абсолютної фотометрії малих астероїдів головного поясу. Стандартизація фотометричних спостережень була проведена для 25 об'єктів нашого дослідження. Стандартизовані фотометричні вимірювання і показники кольору для окремих астероїдів були використані для визначення абсолютного блиску H_V цих об'єктів з використанням HG -функції (докладніше див. підрозділ 4.1 дисертації). Точність показників кольору для окремих ночей спостережень становить величину не гірше $\pm 0.02^m - 0.03^m$. Похибка визначення величини H_V для різних астероїдів

становить від $\pm 0.04^m$ до $\pm 0.15^m$ в залежності від величини кута фази α , при якому проводилася стандартизація вимірювань, а також від похибки використовуваної величини G .

Визначення абсолютного блиску астероїда H_V при відомому значенні його діаметра (наприклад за даними WISE) дають можливість непрямой оцінки геометричного альbedo. Такі визначення альbedo були одержані в цій роботі для 25 малих астероїдів. При порівнянні з даними WISE, одержані в цій роботі альbedo в більшості випадків дещо нижчі, ніж альbedo WISE. Причиною такого завищення даних WISE є використання ефемеридних (тобто оціночних) значень абсолютного блиску, що були одержані при астрометричних безфільтрових спостереженнях астероїдів без урахування амплітуди фотометричної кривої блиску [5, 39]. Однак невелике число аналізованих об'єктів в цій роботі не дає нам можливості говорити про якісь чисельні параметри корекції WISE-альbedo.

У додатку А приведений список публікацій автора за темою дисертаційної роботи та список конференцій за участю автора.

У додатку Б наведено таблицю Б.1 аспектичних даних кратних астероїдів, спостереження яких було виконано в межах роботи (дата спостереження, екліптичні координати, відстані до Сонця та Землі, фазовий кут та фотометрична смуга, в якій виконувались спостереження). У таблиці Б.2 представлено аспектичні дані спостережень одиночних малих астероїдів головного поясу (дата спостереження, екліптичні координати, відстані до Сонця та Землі, фазовий кут, фотометрична смуга, в якій виконувались спостереження, а також абсолютна зоряна величина H_V).

У додатку В наведено фізичні характеристики малих астероїдів головного поясу, спостереження яких було проведено у межах роботи (період обертання, амплітуда кривої блиску, показники кольору $B - V$ та $V - R$, абсолютна зоряна величина H_V , діаметр, альbedo та примітки щодо виявленої кратності об'єкта).

ВИСНОВКИ

Дисертація присвячена питанням ПЗЗ-фотометрії астероїдів малих розмірів головного поясу, визначенню періодів їх осьового обертання, виявленню кратних систем серед цих об'єктів і дослідженню їх параметрів, визначенню фізичних характеристик – абсолютного блиску, показників кольору, діаметрів і альbedo малих астероїдів, що вперше спостерігались фотометричним методом. У процесі проведення досліджень за темою дисертаційної роботи виконано поставлені задачі та отримано наступні найбільш вагомні результати:

1. Відкрито 15 нових подвійних і 4 потрійних систем серед астероїдів малих розмірів головного поясу і визначено їх параметри: орбітальний період, періоди обертання і співвідношення діаметрів окремих компонентів.

2. Виявлено нову повністю синхронну подвійну систему астероїда 8474 Rettig, яка належить до рідкісної групи подвійних астероїдів з приблизно рівними за розміром компонентами та синхронним обертанням. Визначено її параметри і зроблено оцінку діаметрів компонентів цієї системи.

3. Протягом 220 ночей проведено фотометричні спостереження 76 астероїдів з діаметрами менше 15 км і на їх основі вперше отримано значення періодів

осьового обертання для 70 астероїдів головного поясу, які увійшли складовою частиною до бази даних кооперативної програми BinAstPhotSurvey і міжнародних баз даних «Asteroid Photometric Catalogue» і «Planetary Data System, NASA».

4. Для 25 малих астероїдів головного поясу вперше визначено абсолютні зоряні величини і показники кольору $V - R$, а також зроблено оцінки діаметрів, альbedo і мінералогічного типу поверхні цих астероїдів. Показано, що величина альbedo малих астероїдів головного поясу, що визначена за даними інфрачервоних вимірювань супутником WISE, завищена приблизно на 30% через систематичні похибки значень абсолютної зоряної величини астероїдів у базах даних Міжнародного центру малих планет (MPC), які використовувалися при аналізі ІЧ-вимірювань.

5. Аналіз отриманих у роботі основних параметрів асинхронних кратних систем, які характеризуються коротким періодом обертання (близьким до межі руйнування) і слабкою подовженістю форми основного компонента, показав, що їх середні характеристики відповідають теоретичним гіпотезам про вплив YORP-ефекту на механізм виникнення подвійності і еволюцію малих астероїдів з внутрішньою структурою типу «купа каміння».

6. Показано, що розподіл за швидкостями обертання малих астероїдів внутрішньої частини головного поясу ($a < 2.6$ а.о.) має надлишки швидкого і повільного обертання в порівнянні з розподілом для малих астероїдів зовнішньої частини поясу ($a > 2.6$ а.о.). Ці надлишки є наглядним доказом впливу YORP-ефекту на осьове обертання астероїдів малих розмірів у внутрішній частині головного поясу.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ОПУБЛІКОВАНІ В РОБОТАХ:

У реферованих наукових журналах:

1. Shevchenko, V. G., Krugly, Yu. N., *Chiorny*, V. G., Belskaya, I. N., Gaftonyuk, N. M., 2003. Rotation and photometric properties of E-type asteroids. *Planet. Space Sci.*, 51, 525–532.
2. *Chiorny*, V.G., Shevchenko, V. G., Krugly, Yu. N., Velichko, F. P., Gaftonyuk, N. M., 2007. Photometry of asteroids: lightcurves of 24 asteroids obtained in 1993-2005. *Planet. Space Sci.*, 55, 986–997.
3. Durech, J., Vokrouhlický, D., Kaasalainen, M., Higgins, D., Krugly, Y. N., Gaftonyuk, N. M., Shevchenko, V. G., *Chiorny*, V.G., Hamanova, H., Hamanova, H., Reddy, V., Dyvig, R.R. , 2008. Detection of the YORP effect in asteroid (1620) Geographos. *Astronomy and Astrophysics*, 489 (2), L25–L28.
4. Pravec, P., Harris, A. W., Vokrouhlicky, D., Warner, B. D., Kusnirak, P., Hornoch, K., Pray, D.P., Higgins, D., Oey, J., Galad, A., Gajdos, S., Kornos, L., Vilagi, J., Husarik, M., Krugly, Yu. N., Shevchenko, V., *Chiorny*, V., Gaftonyuk, N., Cooney, W. R. Jr., Gross, J., Terrell, D., Stephens, R. D., Dyvig, R., Reddy, V., Ries, J.G., Colas, F., Lecacheux, J., Durkee, R., Masi, G., Koff, R.A., Goncalves, R., 2008. Spin rate distribution of small asteroids. *Icarus*, 197 (2), 497–504.

5. **Chiorny, V.**, Galád A., Pravec, P., Kušnirák, P., Hornoch, K., Gajdoš, Š., Kornoš, L., Világi, J., Husárik, M., Kaňuchová, Z., Krišandová, Z., Higgins, D., Pray, D.P., Durkee, R., Dyvig, R., Reddy, V., Oey, J., Marchis, F., Stephens, R. D., 2011. Absolute photometry of small main-belt asteroids in 2007–2009. *Planet. Space Sci.*, 59 (13), 1482–1489.
6. Pravec, P., Scheirich, P., Vokrouhlicky, D., Harris, A.W., Kušnirák, P., Hornoch, K., Pray, D.P., Higgins, D., Galád, A., Világi, J., Gajdoš, Š., Kornoš, L., Oey, J., Husárik, M., Cooney, W. R., Gross, J., Terrell, D., Durkee, R., Pollock, J., Reichart, D., Ivarsen, K., Haislip, J., LaCluyze, A., Krugly, Yu. N., Gaftonyuk, N., Stephens, R.D, Dyvig, R., Reddy, V., **Chiorny, V.**, Vaduvescu, O., Longa-Pena, P., Tudorica, A., Warner, B.D., Masi, G., Brinsfield, J., Goncalves, R., Brown, P., Krzeminski, Z., Gerashchenko, O., Shevchenko, V., Molotov, I., Marchis, F. 2012. Binary asteroid population. 2. Anisotropic distribution of orbit poles of small, inner main-belt binaries. *Icarus*, 218, 125–143.
7. Oey, J., Inasaridze, R., Kvaratskhelia, O., Ayvazian, V., **Chiorny, V.**, Krugly, Yu., Molotov, I., Warner, B., Pravec, P., Kusnirak, P., Higgins, D., Pollock, J., Haislip, J., Ivarsen K., Reichard D., Lacluyse A., Galad A., 2013. Lightcurve analysis in search of binary asteroids. *Minor Planet Bull.*, 40, 169–172.
8. Pravec, P., Scheirich, P., Kušnirák, P., Hornoch, K., Galád, A., Naidu, S.P., Pray, D.P., Világi, J., Gajdoš, Š., Kornoš, L., Krugly, Yu. N., Cooney, W.R., Gross, J., Terrell, D., Gaftonyuk, N., Pollock, J., Husárik, M., **Chiorny, V.**, Stephens, R.D, Durkee, R., Reddy, V., Dyvig, R., Vrástl, J., Zizka, J., Motolla, S., Hellmich, S., Oey, J., Benishek, V., Kryszczyńska A., Higgins, D., Ries, J., Marchis, F., Baek, M., Macomber, B., Inasaridze, R., Kvaratskhelia, O., Ayvazian, V., Rumyantsev, V., Masi, G., Colas, F., Lecacheux, J., Montaigut, R., Leroy, A., Brown, P., Krzeminski, Z., Molotov, I., Reichart, D., Haislip, J., LaCluyse, A., 2016. Binary asteroid population. 3. Secondary rotations and elongations. *Icarus*, 267, 267–295.

У повідомленнях Міжнародного Астрономічного Союзу (IAU CBET):

9. Oey, J., Pravec, P., Kusnirak, P., Krugly, Yu., **Chiorny, V.**, Ries, J., 2007. (10208) 1997 QN1. CBET 1087.
10. Pray, D., Pravec, P., Kusnirak, P., Hornoch, K., Krugly, Yu., **Chiorny, V.**, Husarik, M., Pikler, M., Vilagi, J., Gajdos, S., Galad, A., Cooney, W., Gros, J., Terrell, D., Gaftonyuk, N., Stephens, R., Durkee, R., Marchis, F., Baek, M., Macomber, B., Reddy, V., Colas, F., Lecacheux, J., Ries, J., 2007. (16635) 1993 QO. CBET 1143.
11. Pravec, P., Kusnirak, P., Hornoch, K., Vilagi, J., Kornos, L., Galad, A., Higgins, D., **Chiorny, V.**, Pray, D., Stephens, R., Reddy, V., Dyvig, R., 2007. (32008) 2000 HM53. CBET 1078.
12. Oey, J., Pravec, P., Kusnirak, P., Hornoch, K., Stephens, R., Gajdos, S., Kornos, L., **Chiorny, V.**, 2008. (15268) 1990 WF3. CBET 1542.

13. Oey, J., Pravec, P., Kusnirak, P., Hornoch, K., Brinsfield, J., *Chiorny, V.*, Pray, D., Pikler, M., Husarik, M., 2009. (3868) Mendoza. CBET 1835.
14. Pray, D., Brookfield, D., Hornoch, K., Kushnirak, P., Pravec, P., *Chiorny, V.*, Krugly, Yu., Husarik, M., Pikler, M., Marchis, M., Macomber, B., Kislak, M., Vilagi, J., Gajdos, M., 2009. (6708) Bobbievaile. CBET 1794.
15. Warner, B., Pravec, P., Kusnirak, P., Hornoch, K., Vilagi, J., Kornos, L., Gajdos, S., Veres, P., Galad, A., Cooney, W., Gross, J., Terrell, D., Krugly, Yu., *Chiorny, V.*, 2009. (2131) Mayall. CBET 2105.
16. Durkee, R., Pravec, P., Hornoch, K., Kusnirak, P., Pray, D., *Chiorny, V.*, Shevchenko, V., Oey, J., Gaftonyuk, N., Krugly, Yu., Higgins, D.; Vilagi, J., Gajdos, S., Husarik, M., Pikler, M., Ries, J. G., 2010. (15700) 1987 QD. CBET 2540.
17. Pollock, J., Pravec, P., Kusnirak, P., Hornoch, K., *Chiorny, V.*, Gajdos, S., Reichart, D. E., Ivarsen, K. M., Haislip, J. B., LaCluyze, A., 2011. (2815) Soma. CBET 2705.
18. Pravec, P., Kusnirak, P., Hornoch, K., Galad, A., Krugly, Yu.N., *Chiorny, V.*, Inasaridze, R., Kvaratskhelia, O., Ayvazian, V., Parmonov, O., Pollock, J., Mottola, S.; Oey, J., Pray D., Zizka, J., Vrstil, J., Molotov, I., Reichart, D.E., Ivarsen, K.M., Haislip, J.B., LaCluyze, A. A., 2013. (8306) Shoko. IAUC 9268.
19. Pray, D., Pravec, P., *Chiorny, V.*, Krugly Yu. N., Benishek, V., Pollock, J., Caton, D., Smith, A. B., Hawkins, R. L., Inasaridze, R., Montaigut, R., Leroy, A., Reichart, D. E., Haislip, J. B., LaCluyze, A. P., 2014. (2623) Zech. CBET 4012.
20. Benishek, V., Pollock, J., Caton, D., Pravec, P., Pray, D., *Chiorny, V.*, Reichart, D., Haislip, J., Smith, A., 2015. (4272) Entsuji. CBET 4158.
21. *Chiorny, V.*, Benishek, V., Pravec, P., Kusnirak, P., Krugly, Yu., Oey, J., Groom, R., Reddy, V., Pray, D., Cooney, W., Gross, J., Terrell, D., Inasaridze, R., Ayvazian, V., Zhuzhanidze, V., Montaigut, R., Leroy, A., Molotov I., 2015. (8474) Rettig. CBET 4122.
22. Pray, D. , Pravec, P., Hornoch, K., Kusnirak, P., Vrstil, J., Kucakova, H., *Chiorny, V.*, Shevchenko, V., Reddy, V., Cooney, W., Gross, J., Terrell, D., Takir, D., Sanchez, J. A., Hardersen, P. S., 2015. (4514) Vilen. CBET 4101.
23. Pollock, J., Caton, D., Hawkins, R., Pravec, P., Pray, D., Cooney, W., Gross, J., Terrell, D., Oey, J., Benishek, V., Galad, A., Gajdos, S., *Chiorny, V.*, Reichart, D., Haislip, J., Smith, A., 2015. (2343) Siding Spring. CBET 4206.
24. *Chiorny, V.*, Pravec, P., Romeuf, D., Montaigut, R., Leroy, A., Gillier, C., Benishek, V., Marchini, A., Papini, R., Salvaggio, F., Oey, J., 2016. (5112) Kusaji. CBET 4336.
25. Pray, D., Pravec, P., Hornoch, K., Kusnirak, P., Carbognani, A., Krugly, Yu. N., *Chiorny, V.*, Inasaridze, R., Ayvazian, V., Kvaratskhelia, O., Husarik, M., Pikler, M., Benishek, V., Molotov, I., 2016. (5872) Sugano. CBET 4327.

26. Pray, D., Pravec, P., Benishek, V., Oey, J., *Chiorny, V.* 2017. (12326) Shirasaki. CBET 4345.
27. Cooney, W., Benishek, V., Pravec, P., Kucakova, H., Hornoch, K., Kusnirak, P., Vrastil, J., Gross, J., Terrell, D., Pray, D., *Chiorny, V.*, Slyusarev I., Flanagan B., Pellerin, B., Montaigut, R., Leroy, A., 2017. (9972) Minoruoda. CBET 4401.
28. Pray, P., Pravec, P., Kucakova, H., Hornoch, K., Kusnirak, P., *Chiorny, V.*, Gaftonyuk, N, Benishek, V., 2017. (7344) Summerfield. CBET 4412.

У матеріалах та тезах конференцій:

29. *Черный В.Г.*, 2005. Вращательные и динамические свойства низко- и высокоальбедных астероидов по результатам фотометрических измерений. International Conference CAMMAC 2005. September 25 – October 1, 2005. Vinnytsia. С. 27-28
30. *Chiorny, V. G.*, Shevchenko, V.G., Krugly, Yu. N, Velichko, F.P., Gaftonyuk, N.M., 2003. Photometry of Asteroids: New Lightcurves of 16 Asteroids Obtained in 1993-2001. Photometry and polarimetry of Asteroids: Impact on Collaboration. The International Workshop. June 15-18, 2003. Kharkiv, Ukraine. Abstracts. P.9-10.
31. Shevchenko, V. G., Krugly, Yu. N, *Chiorny, V. G.*, Belskaya, I. N., Gaftonyuk, N. M. 2002. Rotation properties of E-type asteroids. Abstract Book International Conference «ACM 2002». Berlin, Germany. P. 74.
32. *Chiorny, V.G.*, Shevchenko, V.G., Krugly, Yu. N., 2005. Photometry of low and high albedo asteroids. Programme and Book of Abstract of Memorial International Conference "Astronomy and Space physics at Kyiv University" May 22-26, 2005 Kiev, Ukraine. P. 101.
33. *Chiorny V.G.*, 2006. Photometry of asteroids: rotation characteristics of the main belt asteroids of various taxonomic types. Abstract Book of the Intern. Conf. "Enlargement of Collaboration in Ground-Based Astron. Research in SEE Countries. Studies of the Near-Earth and Small Bodies of the Solar System" 25-28 Sept.2006, Nikolaev, p.17.
34. *Chiorny V.G.*, 2008. Photometry of small main-belt asteroids: some results. Abstract book of the Intern. Conf. "SOLAR SYSTEM BODIES: FROM OPTICS TO GEOLOGY", May 26-29, 2008, Kharkiv, Ukraine. P. 27-28
35. *Chiorny, V.*, 2014. Photometry of small main-belt asteroids in 2010 – 2013: search for possible binary candidates. Asteroids, Comets, Meteors -2014. Book of Abstracts, Helsinki, Finland, (K. Muinonen et al. , eds.). p. 114.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

36. Bottke, W., F., Jr., Vokrouhlichky, D., Rubincam, D., P., Nesvorny, D., 2006. The Yarkovsky and YORP effects: implications for asteroid dynamics. Annu. Rev. Earth. Planet. Sci., 34, 157–191.

37. Bowell, E., Hapke, B., Domingue, D. et al., 1989. Application of photometric models to asteroids. In Asteroids II (R. P. Binzel, T. Gehrels and M. S. Matthews, Eds.), Univ. of Arizona Press, Tucson, pp. 524–556.
38. Brozovic M., Benner L. A.M., Taylor P.A. et al., 2011. Radar and optical observations and physical modeling of triple near-Earth asteroid (136617) 1994 CC. *Icarus*, 216, 241–256.
39. Faure, G., Garrett, L., 2009. Suggested revised H values of selected asteroids: report number 4. *Minor Planet Bulletin* 36, 140–143.
40. Harris, A. W., Fahnestock, E. G., Pravec, P., 2009. On the shapes and spins of “rubble pile” asteroids. *Icarus* 199, 310–318.
41. Harris A.W., Lupishko D.F., 1989. Photometric lightcurve observations and reduction techniques. In Asteroids II (R. P. Binzel, T. Gehrels, M. Matthews. – Tucson: Univ. Arizona Press , USA, 1989. pp. 39–53.
42. Harris, A.W., Pravec, P., 2006. Rotational properties of asteroids, comets, and TNOs. In: Asteroids, Comets, Meteors, Proceedings of the 229th Symposium of the IAU, Rio de Janeiro, Brasil August 7-12, 2005, Eds.: Lazzaro D.; Ferraz-Mello S.; Fernandes J.A., Cambridge University Press, pp.449–463
43. Jacobson S.A., Scheeres D.J., 2011. Dynamics of rotationally fissioned asteroids: Source of observed small asteroid systems. *Icarus*, 214 (1), 161 – 178.
44. Lupishko D., Tielieusova I., 2014. Influence of the YORP effect on rotation rates of near-Earth asteroids. *Meteoritics and Planetary Science*, 49 (1), 80–85.
45. Masiero J. R., Mainzer A. K., Grav T., et al., 2011. Main Belt Asteroids with WISE/NEOWISE. I. Preliminary Albedos and Diameters. *Astrophys. J.*, 741 (68), 1–20.
46. Margot J.-L., Pravec P., Teylor P., Carry B., Jacobson S., 2015. Asteroid systems: binaries, triples, and pairs. // Asteroids IV./ Eds. P. Michel, F. E. DeMeo, and W. F. Bottke – The University of Arizona Press, Tucson, pp.355–373.
47. Mottola S., de Angelis G., di Martino M., Erikson A., Hahn G., Neukum G., 1995. The near-Earth objects follow-up program: first results. *Icarus* 117, 62–70.
48. Nesvorný D., Morbidelli A., Vokrouhlický D., Bottke W.F., Broz M., 2002. The Flora family: a case of dynamically dispersed collisional swarm ? *Icarus*, 157, 155–172.
49. Ostro S., Margot J.-L., Benner L.A.M. et. al., 2006. Radar Imaging of Binary Near-Earth Asteroid (66391) 1999 KW4. *Science*, 314 (5803), 1276–1280.
50. Pravec P., 2005. Photometric Survey for Asynchronous Binary Asteroids. In Proceed. 24th. Ann. Conf. Society for Astronomical Science, eds: Warner B.D., Dale M., Kenyon D.A., Foote D., Nothwoods Resort, Big Bear Lake, CA, pp.61–67.
51. Pravec P., Harris A.W., 2000. Fast and slow rotation of asteroids. *Icarus*, 148, No.1, 12–20.
52. Pravec P., Harris A.W., 2007. Binary asteroids population. I. Angular momentum content. *Icarus*, 190, 250–259.

53. Pravec P., Scheirich P., Kusnirak P. et al., 2006. Photometric survey of binary near-Earth asteroids. *Icarus*, 181, 63–93
54. Rubincam D.P., 2000. Radiative spin-up and spin-down of small asteroids. *Icarus*, 148 (1), 2–11.
55. Shevchenko, V.G., Lupishko, D.F., 1998. Optical properties of asteroids from photometric data. *Solar System Research*, 32 (3), 220–232.
56. Warner, B.D., Harris, A.W., Pravec, P., 2009a. The asteroid database. *Icarus*, 202, 134–146.

АНОТАЦІЯ

Чорний В. Г. Фотометрія малих астероїдів головного поясу. Обертання та подвійність. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи. – Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2018.

Робота присвячена питанням ПЗЗ-фотометрії астероїдів малих розмірів головного поясу, визначенню періодів їх осьового обертання, виявленню кратних систем серед цих об'єктів і дослідженню їх параметрів, визначенню фізичних характеристик – абсолютного блиску, показників кольору, діаметрів і альbedo малих астероїдів, що вперше спостерігались фотометричним методом.

За результатами фотометричних спостережень автора протягом 220 ночей відкрито 15 нових подвійних і 4 потрійних систем серед астероїдів малих розмірів головного поясу і визначено їх параметри: орбітальний період, періоди обертання і співвідношення діаметрів окремих компонентів. Серед нових кратних систем виявлено повністю синхронну подвійну систему астероїда 8474 Rettig, яка належить до рідкісної групи подвійних астероїдів з приблизно рівними за розміром компонентами та синхронізованим обертанням. Визначено її параметри і зроблено оцінку діаметрів компонентів цієї системи.

Вперше проведено фотометричні спостереження 70 астероїдів головного поясу з діаметрами менше 15 км і на їх основі отримано значення періодів осьового обертання цих астероїдів.

Аналіз отриманих в роботі основних параметрів асинхронних кратних систем, які характеризуються коротким періодом обертання (близьким до межі руйнування) і слабкою подовженістю основного компонента, показав, що їх середні характеристики відповідають теоретичним гіпотезам про вплив YORP-ефекту на механізм виникнення подвійності.

Для 25 астероїдів головного поясу вперше було проведено стандартизацію фотометричних спостережень і визначено їх абсолютні зоряні величини та показники кольору $V - R$, а також зроблено оцінки діаметрів, альbedo і мінералогічного типу поверхні цих астероїдів.

Ключові слова: малі астероїди, криві блиску, період обертання, подвійні астероїди, орбітальний період, ПЗЗ-фотометрія.

ANNOTATION

Chiorny V. G. Photometry of small main-belt asteroids. Rotation and binary.
– Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of physical and mathematical sciences by the speciality 01.03.03 – Heliophysics and physics of the Solar System. – The Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2018.

This thesis focuses on CCD-photometry of small main-belt asteroids, determination of their axial rotation periods, detection of multiple systems among these objects and the research of their parameters, as well as determination of physical characteristics – absolute brightness, colour indices, diameter and albedo of small asteroids, which were observed using the photometric method for the first time.

The main result of this work is the discovery of 15 new binary and 4 triple systems among small main-belt asteroids and determination of their parameters, such as the orbital period and the rotation periods and diameter ratio of their individual components. A fully synchronous binary system of asteroid 8474 Rettig was discovered among the new multiple systems. It represents a rare group of binary asteroids with approximately equally-sized components and synchronous rotation. The parameters of the system have been determined and the diameters of the components have been estimated.

Photometric observations of 70 main-belt asteroids with diameters of less than 15 km carried out for the first time, which made it possible to obtain the values of the rotation periods for these asteroids.

The analysis of the obtained main parameters of asynchronous multiple systems with a short period of rotation close to the destruction boundary and weak elongation of the primary component has shown that their mean parameters support the theoretical hypotheses of the influence of the YORP effect on the binary formation mechanism.

The photometric observations for 25 main-belt asteroids were standardised and for the first time their absolute magnitude and colour index $V - R$ were determined, as well as their diameters, albedo and the mineralogical surface composition were assessed.

The practical value of the thesis and the significance of its findings lie in the multitude of original photometric observations of small asteroids, which have already been applied and can be used in the future for the study of the physical properties of asteroids and comparative analysis of observation data of other small Solar System bodies.

Lightcurves of the 76 asteroids observed in this study have been included in the international databases «Asteroid Photometric Catalogue» and «Planetary Data System, NASA» and are available for general use. The obtained parameters of multiple asteroid systems are of applied significance and can be used to calculate the density and mass of asteroids as well as trajectories and orbits for launching spacecraft to such objects.

The optical characteristics of absolute magnitude and colour indexes obtained for 25 small asteroids can be used in the future for more precise measurements of the albedo of asteroids and determination of their mineralogical surface composition, as well as the ephemeris calculations of apparent magnitudes of these asteroids by the Minor Planet Centre IAU.

Keywords: small asteroids, lightcurves, rotation period, binary asteroids, orbital period, CCD-photometry.

АННОТАЦИЯ

Черный В. Г. Фотометрия малых астероидов главного пояса. Вращение и двойственность. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – Гелиофизика и физика Солнечной системы – Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2018.

Работа посвящена вопросам ПЗС-фотометрии астероидов малых размеров главного пояса, определению периодов их осевого вращения, выявлению кратных систем среди этих объектов и исследованию их параметров, определению физических характеристик – абсолютного блеска, показателей цвета, диаметров и альбедо малых астероидов, впервые наблюдавшихся фотометрическим методом.

Основными результатами работы являются обнаружение новых 15 двойных и 4 тройных систем среди астероидов малых размеров главного пояса и определение их параметров: орбитального периода, периодов вращения отдельных компонент и соотношения их диаметров. Среди новых кратных систем обнаружена полностью синхронная двойная система астероида 8474 Rettig, которая принадлежит к редкой группе двойных астероидов с примерно равными по размеру компонентами и синхронизированным вращением. Определены ее параметры и сделана оценка диаметров компонент этой системы.

Впервые проведены фотометрические наблюдения 70 астероидов главного пояса с диаметрами менее 15 км и на их основе получены значения периодов осевого вращения этих астероидов.

Для 25 астероидов главного пояса впервые была проведена стандартизация фотометрических наблюдений и определены их абсолютные звездные величины и показатели цвета $V - R$, а также сделаны оценки диаметров, альбедо и минералогического типа поверхности этих астероидов.

Ключевые слова: малые астероиды, кривые блеска, период вращения, двойные астероиды, орбитальный период, ПЗС-фотометрия