

Національна академія наук України

Головна астрономічна обсерваторія

СЛЮСАРЕВ ІВАН ГРИГОРОВИЧ

УДК 523.44

**ТРОЯНЦІ ЮПІТЕРА ТА ГРУПА ГІЛЬДИ: ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ
І ПОХОДЖЕННЯ**

01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2015

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,
старший науковий співробітник
Бельська Ірина Миколаївна,
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна МОН України,
провідний науковий співробітник;

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Кисельов Микола Миколайович,
Головна астрономічна обсерваторія
НАН України, завідувач відділу фізики
малих небесних тіл;

кандидат фізико-математичних наук
Кошкін Микола Іванович,
Науково-дослідний інститут
"Астрономічна обсерваторія" при
Одеському національному університеті
імені І. І. Мечникова МОН України,
заступник директора з науки.

Захист відбудеться 6 листопада 2015 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою: ГАО НАН України, 03680, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27.

Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці ГАО НАН України за адресою: ГАО НАН України, 03680, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27.

Автореферат розісланий « 29 » вересня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук

І. Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Два майже одночасні відкриття у 1992 р., а саме: відкриття зовнішнього поясу малих тіл – поясу Койпера та перших екзопланет, призвели до корінного перегляду наших поглядів на ранні стадії еволюції Сонячної системи. Розвинута теорія міграції планет-гігантів навколо інших зір була застосована до Сонячної системи для пояснення особливостей динамічної структури поясу Койпера. При цьому було висунуто нову гіпотезу [26] про походження двох резонансних популяцій малих тіл, що знаходяться за головним поясом астероїдів: троянців Юпітера і групи Гільди. Вона передбачає, що тіла цих груп сформувалися на відстанях більше 15 а. о. і були захоплені на сучасні орбіти під час міграції. Це також неявно передбачає схожість властивостей троянців і групи Гільди із тілами поясу Койпера та кентаврами. Визначення фізичних властивостей цих тіл має вирішальне значення як для перевірки гіпотез про їх походження, так і для кращого розуміння фізичних умов у протопланетному диску і умов утворення та еволюції складної органіки, що, у свою чергу, важливо для кращого розуміння проблеми виникнення життя.

Обсяг отриманих даних про фізичні та динамічні властивості троянців Юпітера та астероїдів групи Гільди на момент початку роботи за темою дисертації (2009 р.) був менш ніж задовільний, особливо у порівнянні із іншими популяціями малих тіл. Основна частина цих даних була отримана за допомогою наземних телескопічних спостережень. Такі спостереження ще довго будуть залишатись основним джерелом інформації про ці дві групи малих тіл, оскільки космічні місії до їх представників знаходяться на стадії розробки концепції [30]. Тому отримані з фотометричних спостережень дані про фізичні властивості троянців та тіл групи Гільди можуть використовуватися при відборі майбутніх цілей космічних місій.

Все це і визначає актуальність досліджень фізичних властивостей троянців Юпітера та об'єктів групи Гільди, проведених у цій роботі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в межах наступних держбюджетних НДР Науково-дослідного інституту астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна:

- "Фізичні властивості астероїдів, тіл поясу Койпера і комет за даними фотометрії та поляриметрії" (2007–2009 рр., № держ. реєстрації 0199U004412);
- "Опозиційні ефекти малих тіл Сонячної системи: спостереження і лабораторне моделювання" (2009–2010 рр., № держ. реєстрації 0109U001869);
- "Телескопічні дослідження астероїдів, тіл поясу Койпера і комет"

- (2010–2012 рр., № держ. реєстрації 0110U001035);
- "Фізичні властивості малих тіл Сонячної системи за даними телескопічних спостережень і чисельного моделювання" (2013–2015 рр., № держ. реєстрації 0112U006958);
- "Фотометрична стандартизація світлорозсіюючих поверхонь в космічних і астрономічних дослідженнях тіл Сонячної системи" (2013–2014 рр., № держ. реєстрації 0112U006961).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є дослідження фізичних властивостей обраних троянців Юпітера і астероїдів групи Гільди за даними фотометричних спостережень, а також перевірка узгодженості основних висновків гіпотез про їх походження з накопиченими даними про фізичні властивості цих тіл.

Виходячи із сформульованої мети, були поставлені і вирішені наступні завдання:

1. Проведення ПЗЗ-фотометрії в декількох спектральних смугах обраних троянців Юпітера і астероїдів групи Гільди у максимально доступному діапазоні фазових кутів, включаючи область опозиційного ефекту.
2. Визначення параметрів обертання, а також оптичних властивостей поверхні обраних троянців Юпітера і об'єктів групи Гільди за результатами проведених спостережень.
3. Порівняння фазових залежностей блиску троянців Юпітера, об'єктів групи Гільди, астероїдів головного поясу і кентаврів.
4. Аналіз наявних даних про властивості троянців Юпітера і астероїдів групи Гільди з точки зору відповідності основним положенням і висновкам наявних гіпотез про походження цих резонансних груп.

Об'єктами дослідження є астероїди – троянці Юпітера та тіла групи Гільди.

Предмет дослідження – фізичні властивості астероїдів, що входять до даних груп.

Методи дослідження: ПЗЗ-фотометрія, узагальнення та порівняльний аналіз отриманих даних.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше з високою точністю виміряно фазові залежності блиску троянців Юпітера і знайдено, що у всіх цих тіл відсутня нелінійна ділянка в області опозиційного ефекту аж до гранично малих фазових кутів (0.1° – 0.4°). Вперше показано, що троянці Юпітера і астероїди групи Гільди, які належать до типів P і D, характеризуються однаковими в межах точності спостережень лінійними фазовими залежностями блиску, при цьому останні збігаються з фазовими залежностями астероїдів головного поясу аналогічних композиційних типів і суттєво відрізняються за величиною фазового коефіцієнта від кентаврів.
2. Показано, що величини альbedo троянців і астероїдів групи Гільди, розраховані за даними радіометричних оглядів, систематично завищені

через використання абсолютних зоряних величин бази даних Центру малих планет. Для обчислення абсолютних зоряних величин троянців Юпітера і астероїдів групи Гільди запропоновано використовувати лінійну фазову функцію, що дає змогу істотно зменшити систематичні похибки.

3. Вперше виявлено статистично значиму відмінність у розподілах нахилів орбіт троянців, що належать до груп L_4 і L_5 , що накладає обмеження на гіпотези про їх походження.
4. За результатами аналізу сукупності наявних даних про фізичні і динамічні властивості троянців Юпітера зроблено висновок про те, що найімовірніше ці об'єкти є реліктовими тілами, а не захопленими із зовнішньої частини протопланетного диску на ранній стадії еволюції Сонячної системи.
5. Протягом 167 ночей проведено фотометричні спостереження 11 троянців Юпітера і 12 об'єктів групи Гільди. Вперше отримано детальні фазові залежності блиску для 6 об'єктів, уточнено періоди осьового обертання 8 троянців і 7 астероїдів групи Гільди, а для 4 представників групи Гільди періоди визначено вперше. Показники кольору V-R вперше визначено або уточнено для 22 астероїдів, а B-V – для 9. Амплітуди кривих блиску і абсолютні зоряні величини визначені для всіх астероїдів, що спостерігалися.

Практичне значення одержаних результатів. Практичну цінність дисертації обумовлено великою кількістю нових фотометричних спостережень, які можуть бути використані в майбутньому як для вивчення фізичних властивостей астероїдів групи Гільди і троянців Юпітера, так і при порівняльному аналізі спостережних даних інших малих тіл Сонячної системи. Отримані в цій роботі результати мають також наступне практичне значення:

1. Криві блиску, що отримані в результаті фотометричних спостережень 23 астероїдів, увійшли до Міжнародної бази даних "The Asteroid Lightcurve Database" і надалі будуть використані для визначення форми, орієнтації осі обертання, а також оптичних властивостей їх поверхонь.
2. Вперше отримані детальні фазові залежності блиску троянців Юпітера і астероїдів групи Гільди вказують на високий ступінь однорідності цих двох груп за оптичними властивостями, вони можуть бути використані для більш точного обчислення їх видимого блиску в ефемеридах.
3. Результати спостережень і дані про фізичні властивості астероїдів групи Гільди і троянців Юпітера можуть бути використані при плануванні космічних місій до цих тіл та вибору конкретних цілей.

Достовірність і обґрунтованість результатів досліджень підтверджується достатньою кількістю спостережних ночей, використанням відпрацьованої методики спостережень, що дає змогу коректно враховувати усі основні фактори, які впливають на похибку спостережень, при визначенні

блиску об'єктів методами відносної та абсолютної фотометрії, також малою розбіжністю значень показників кольору, отриманих у різні ночі спостережень та у різні опозиції для одного і того самого астероїда; апробацією результатів досліджень у фахових міжнародних журналах, а також на міжнародних наукових конференціях.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертації викладено у публікаціях [1–8].

Так, у роботах [1, 3] автор брав участь у спостереженнях та їх обробці.

Здобувач брав участь у формулюванні мети, спостереженнях, їх обробці, аналізі, а також у написанні статті [2] за отриманими результатами.

У роботі [4] постановка задачі, опрацювання всіх спостережень, аналіз отриманих результатів та написання статті належать автору.

Дисертант приймав участь у спостереженнях, їх обробці та обговоренні отриманих результатів, що опубліковані у роботі [5].

У роботі [6] автору належить постановка задачі, відбір та аналіз матеріалів та написання статті.

Роботи [7, 8] написані автором, ним також були поставлені задачі, виконаний аналіз спостережного матеріалу та отриманих результатів.

Спостережний матеріал одержано разом із В.Г. Шевченком, В.Г. Чорним та Ю.М. Круглим.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи обговорювалися на наукових семінарах НДІ астрономії ХНУ імені В.Н. Каразіна, ГАО НАН України, НДІ "Астрономічна обсерваторія" при ОНУ імені І.І. Мечникова та були представлені або доповідалися на наступних наукових конференціях:

1. Міжнародних конференціях "Lunar and Planetary Science Conference", США, 2009 р., 2012 р., 2013 р.
2. Астрономічних школах молодих вчених, Херсон, травень 2009 р.; Чернігів, травень 2011 р.
3. Міжнародній конференції "Astronomy and Space Physics in Taras Shevchenko National University of Kyiv", присвяченій 105-річчю із дня народження С. К. Всехсвятського, Київ, травень 2010 р.
4. Міжнародній науковій школі NATO Advanced Study Institute conference on "Special Detection Technique (Polarimetry) and Remote Sensing", Київ, вересень 2010 р.
5. На Всеросійській відкритій конференції "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, Росія, листопад 2011 р.
6. Міжнародній конференції молодих вчених "19th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics", Київ, квітень 2012 р.
7. Міжнародних конференціях "Asteroids, Comets, Meteors", Ніїгата, Японія, травень 2012 р.; Хельсінкі, Фінляндія, червень 2014 р.

Публікації. Основні результати та висновки дисертації опубліковано у 6 статтях у міжнародних та українських фахових наукових журналах [1–6] та у 14 тезах та працях міжнародних конференцій [7–20].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури і одного додатка. Повний обсяг дисертації – 192 сторінки, у тому числі список літератури із 234 найменувань. Робота ілюстрована 57 рисунками та містить 11 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.

Розділ 1. Резонансні популяції малих тіл: група Гільди та троянці Юпітера (огляд літератури за темою дисертації). У першому підрозділі коротко наведено історію відкриття тіл, що належать до троянців Юпітера та групи Гільди, та надано загальну характеристику двох популяцій. Також відмічено зміну уявлень про ці популяції з моменту їх відкриття: від погляду на них як на окремі тіла із незвичними орбітами до усвідомлення численності тіл цих груп, відокремлених від головного поясу астероїдів не тільки динамічно, але і за деякими фізичними параметрами. Далі розглянуто розподіл абсолютних зоряних величин представників досліджуваних груп та наведено оцінки їх загальної численності, тобто окреслено місце, яке займають троянці Юпітера та група Гільди серед інших популяцій малих тіл Сонячної системи.

У наступному підрозділі аналізуються гіпотези про походження цих двох груп астероїдів. Так, до середини 2000-х рр. домінуючою була гіпотеза, згідно якої обидві групи розглядались як реліктові, тобто тіла, що входять до них, сформувалися поблизу місця їх сучасного знаходження та були захоплені гравітаційним полем Юпітера на стадії експоненційно швидкого росту його маси [25]. Сукупність даних про динамічну структуру поясу Койпера та розподіл великих півосей планет навколо інших зір, призвела до розробки гіпотез, що включали міграцію планет-гігантів у Сонячній системі. Зокрема, запропоновано гіпотезу так званого "хаотичного захоплення" троянців [26]. У цій гіпотезі одним із основних є висновок про те, що місцем формування тіл, захоплених на сучасні троянські орбіти, є диск планетезималей, що знаходився на відстанях 15–30 а. о. Таким чином, передбачається, що сучасна популяція троянців Юпітера та група Гільди повинні бути близькими за фізичними властивостями із іншими тілами, що утворилися на тих самих відстанях. До таких, зокрема, належать об'єкти поясу Койпера та кентаври. Саме тому порівняння фізичних властивостей троянців Юпітера, групи Гільди, астероїдів головного поясу і кентаврів є досить важливим.

Далі наведено дані про фізичні властивості тіл групи Гільди та троянців

Юпітера, що накопичені на 2009 р. – момент початку роботи над дисертацією. Не зважаючи на значну кількість публікацій [див., наприклад, 22 та 24], присвячених дослідженню астероїдів, що входять до цих груп, обсяг даних про параметри обертання, форму, властивості та склад поверхонь цих тіл був дуже обмежений. Слід також зауважити, що на відміну від головного поясу астероїдів і кентаврів, для цих двох резонансних популяцій практично повністю була відсутня інформація про залежність блиску від фазового кута. Крім того, припущення про значну частку водяного льоду та складної органіки у тілах типів P та D, що домінують у обох групах, досі не дістало надійного спостережного підтвердження.

Розділ 2. Апаратура, методика спостережень та їх обробка. На початку цього розділу описано основні характеристики апаратури, що використовувалася при спостереженнях. Так, основні спостереження було виконано на 0.7-м телескопі АЗТ-8 Чугуївської спостережної станції ХНУ імені В.Н. Каразіна, оснащеному ПЗЗ-камерою IMG47-10, квантова ефективність якої у діапазоні 0.5–0.7 мкм перевищує 90%. З метою отримання першої детальної фазової залежності блиску троянця (588) Ахілл була організована міжнародна програма спостережень, у межах якої спостереження проводились, крім АЗТ-8, на 1-м телескопі Цейс-1000 Кримської астрофізичної обсерваторії, 1.5-м телескопі Майданакської обсерваторії (Узбекистан) та 2-м телескопі Цейс-2000 обсерваторії Рожен (Болгарія) [2, 7]. У таблиці 1 наведено параметри телескопів та ПЗЗ-камер, що використовувалися.

Таблиця 1

Параметри апаратури, яка використовувалася для спостережень

Телескоп	0.7 м, Чугуїв	1 м, Сімеїз	1.5 м, Майданак	2 м, Рожен
Світлосила	f/4	f/13	f/8	f/8
ПЗЗ-камера	IMG 47-10	PL-09000	SI 620-627	VersArray1300B+
Кількість пікселів	1056×1027	3056×3056	4096×4096	1340×1300
Лінійний розмір	13×13 мкм	12×12 мкм	15×15 мкм	20×20 мкм
Кутовий розмір	0.96" × 0.96"	0.19" × 0.19"	0.26" × 0.26"	0.26" × 0.26"
Поле зору	16.9' × 16.4'	9.5' × 9.5'	17.7' × 17.7'	5.5' × 5.0'

Описано методику планування і проведення спостережень та редукції первинних ПЗЗ-зображень, яка використовувалась при отриманні та опрацюванні всього спостережного матеріалу. Процес редукції включає як корекцію за теплові шуми ПЗЗ-матриці, так і корекцію за нерівномірність чутливості матриці по її поверхні. Він полягає у тому, що від кожного знімка спочатку віднімається усереднений темновий знімок, а потім кожний знімок ділиться на усереднений знімок плоского поля. Після цього зображення вважалися каліброваними та придатними для вимірювань.

Далі викладено основні особливості методу апертурної фотометрії, що використовувався у роботі для вимірювань блиску астероїдів і зір порівняння на зредукованих ПЗЗ-зображеннях, методику визначення фізичних параметрів астероїдів за даними фотометричних спостережень, зокрема методику вимірювання кривої блиску астероїда, визначення періоду обертання, показників кольору. Також описано процедуру стандартизації зір порівняння – тобто приведення їх блиску, а відповідно і блиску астероїда, до стандартної системи BVRI Джонсона–Козінса. Така стандартизація можлива, оскільки інструментальна фотометрична система шляхом підбору світлофільтрів реалізована достатньо близькою до стандартної. Ця умова була виконана на усіх телескопах, що використовувалися. Після того, як блиск астероїда приведено до стандартної фотометричної системи, можна побудувати фазову залежність блиску. Оскільки, крім зміни блиску астероїда за рахунок його обертання навколо власної осі, має місце також зміна блиску через зміну геометрії освітлення/спостереження, то постає задача розділення впливу цих двох факторів. Успішне її вирішення можливе за умови добре вимірної кривої блиску, оскільки для віддалених тіл, якими є астероїди групи Гільди та троянці Юпітера, за період осьового обертання астероїда фазовий кут (кут між напрямками на спостерігача та на Сонце, вершиною якого є астероїд) практично не змінюється. Після того, як визначено період осьового обертання та отримано складену криву блиску астероїда, фазова залежність блиску будувалась наступним чином: обиралась найбільш повна індивідуальна крива блиску, отримана при певному значенні фазового кута, далі на неї накладались криві блиску у тому самому фільтрі, отримані при інших фазових кутах, величини необхідних для цього зміщень були кількісним показником зміни блиску у залежності від кута фази.

У цьому розділі описано також двопараметричну функцію HG, яка за рішенням Міжнародного астрономічного союзу (1985 р.) використовується Центром малих планет для отримання значення їх абсолютної зоряної величини шляхом апроксимації усього масиву наявних фотометричних оцінок блиску, та її модифікацію із трьома параметрами HG_1G_2 , яка повинна замінити стару функцію. На прикладі троянця (588) Ахілл показано, що нелінійна функція HG не спроможна коректно апроксимувати лінійну фазову залежність і її використання призводить до завищення абсолютної зоряної величини. Навіть при апроксимації цією функцією фазової залежності астероїда С-типу із групи Гільди (334) Чикаго, що демонструє наявність нелінійного росту блиску на малих кутах фази (опозиційний ефект), має місце суттєве відхилення HG-функції від реальних даних.

Таким чином, підводячи підсумки, у другому розділі показано, що використана методика планування, проведення та обробки спостережень, яка відпрацьована на багаторічному досвіді відділу фізики астероїдів і комет НДІ астрономії ХНУ імені В.Н. Каразіна, дає змогу досягти точності диференційної фотометрії не гірше 0.01–0.02 зор. вел. для об'єктів 15–16 зор. вел. Точність приведення блиску до стандартної системи визначалась точністю використаних фотометричних стандартів і складала 0.02–0.04 зор.

вел. в залежності від фільтра, у кому велись спостереження. Все це дало змогу успішно вирішити поставлені спостережні завдання. Наведено порівняння із результатами абсолютної фотометрії інших авторів, що демонструють переваги нашого підходу.

Розділ 3. Результати спостережень вибраних троянців Юпітера і астероїдів групи Гільди. Усього з 2007 р. до 2013 р. протягом 167 ночей проведено спостереження 23 астероїдів групи Гільди і троянців Юпітера. Для спостережень були відібрані тіла, максимально різноманітні за своїми динамічними і фізичними властивостями, які дають, з нашої точки зору, досить повну уяву про кожен із досліджуваних популяцій.

Для астероїдів наведено отриману зі спостережень інформацію про такі їх характеристики, як період осевого обертання, амплітуда кривої блиску, показники кольору та абсолютна зоряна величина. Також у випадку, якщо астероїд спостерігався раніше, вказано, чи підтверджують або уточнюють, чи спростовують наші дані величини періоду, що опубліковані.

Спочатку у цьому розділі наведено дані про результати спостережень 11 троянців Юпітера, із яких 7 належать до групи L₄, а 4 – до групи L₅. У таблиці 2 подано результати наших спостережень для кожного троянця: ім'я, діапазон фазових кутів, у якому проведені спостереження, абсолютну зоряну величину, період обертання і амплітуду кривої блиску, показник кольору V-R.

Таблиця 2

Результати спостережень троянців Юпітера

Астероїд	Діапазон фазових кутів, град.	H _v зор.вел.	Період, год.	Амп., зор.вел.	V-R, зор.вел.
588 Ахілл	0.08–9.7	8.47±0.03	7.306±0.001	0.31±0.01	0.43±0.03
884 Пріам	0.2–11.2	8.98±0.02	6.8615±0.0005	0.37±0.01	0.46±0.02
911 Агамемнон	9.4–11.1	7.95±0.08	6.585±0.004	0.05±0.02	0.36±0.02
1143 Одисей	0.3–11.8	8.57±0.02	10.1120±0.0005	0.22±0.01	0.48±0.02
2207 Антенор	0.2–10.1	9.08±0.02	7.9659±0.0005	0.14±0.02	0.45±0.01
2357 Ферекл	0.3–9.2	9.07±0.03	7.22±0.05	0.08±0.03	0.45±0.02
3451 Ментор	8.3–9.8	9.02±0.05	7.698±0.005	0.28±0.01	0.37±0.02
4063 Евфорб	12.1–12.3	8.94±0.05	8.755±0.015	0.31±0.02	0.47±0.01
4709 Енном	5.2–10.9	8.45±0.08	12.2696±0.0005	0.45±0.02	0.39±0.02
5511 Клоант	10.7–10.9	11.1±0.11	–	>0.05	0.48±0.01
12929 1999 TZ1	8.7–11.6	10.7±0.21	–	0.08±0.02	0.47±0.01

Для двох тіл тип за класифікацією Толена [29] не був визначений, один троянець був віднесений до P-типу, решта 8 – до D-типу.

Криві блиску отримано для 10 з 11 троянців, що спостерігалися. Для астероїда (5511) Клоант наші дані вказують на дуже великий період, що в подальшому було підтверджено [27]. Діапазон амплітуд кривих блиску складає 0.05±0.37 зор. вел., знайдені нами значення періодів обертання

знаходяться у інтервалі від 6.5 год. до 12.2 год. Для 8 троянців значення періодів осьового обертання уточнені. Показники кольору V-R визначено для 11 троянців. Для 5 об'єктів також отримано показники кольору B-V, що знаходяться в діапазоні 0.70–0.74, тільки у астероїда (884) Пріам він дорівнює 0.82. Фазові коефіцієнти (нахили лінійної частини фазової залежності), виміряно з високою точністю у 6 троянців, вони складають 0.040–0.044 зор. вел./град. Спостереження 5 троянців охоплюють і гранично малі фазові кути, в усіх цих тіл відсутнє нелінійне зростання блиску на малих фазових кутах.

Далі наведено отримані результати спостережень 12 астероїдів групи Гільди. Для двох астероїдів тип не був визначений, один був віднесений до малочисельного серед цієї групи С-типу, 3 тіла класифіковані як Р-тип, решта 6 – належать до D-типу.

У таблиці 3 наведено числові значення параметрів кожного астероїда групи Гільди, що отримані зі спостережень.

Таблиця 3

Результати спостережень астероїдів групи Гільди

Астероїд	Діапазон фазових кутів, град.	H_v зор.вел.	Період, год.	Амп., зор.вел.	V-R, зор.вел.
334 Чикаго	0.1–13.6	7.67±0.03	7.3605±0.0005	0.35	0.36±0.01
1038 Такія	0.4–0.9	10.71±0.02	>20	>0.05	0.45±0.02
1162 Лариса	0.5–10.7	9.84±0.02	6.5195±0.0005	0.20	0.42±0.01
1180 Рита	4.1	9.37±0.03	–	0.05	0.44±0.01
1269 Ролландія	5.3–11.6	8.98±0.05	>36	>0.03	0.47±0.02
1578 Кірквуд	0.3–14.3	10.57±0.03	>100	>0.2	0.46±0.02
1746 Брауер	0.1–10.4	10.41±0.01	19.7165±0.0005	0.33	0.45±0.03
1748 Модерлі	0.2–18.4	10.86±0.03	6.0018±0.0009	0.15	0.45±0.02
1754 Каннінхем	3.64	9.98±0.02	4.2465±0.0015	0.11	0.34±0.02
3134 Костинський	8.2–8.5	10.85±0.04	14.7125±0.0001	0.40	0.46±0.02
3990 Хеймдал	1.5–12.6	11.60±0.04	>100	>0.5	0.47±0.02
9829 Мурільо	0.4	12.43±0.03*	>6	>0.35	–

*– вказано абсолютну зоряну величину у фільтрі R.

У результаті для 9 астероїдів групи Гільди вперше визначено, істотно поліпшено або зроблено оцінки періодів обертання. Величини періодів обертання лежать у межах від 4.2 до 19.7 годин, а для чотирьох астероїдів наші спостереження вказують на довгі періоди, для визначення яких потрібні подальші спостереження. Із 12 тіл групи Гільди, що спостерігалися, для 6 періоди перевищують 12 годин, що підтверджує результат [23] про надлишок тіл із повільним обертанням. Амплітуди кривих блиску лежать у діапазоні 0.08–0.37 зор. вел.

Показники кольору V-R виміряно для 11 астероїдів. Для чотирьох об'єктів також виміряно показник кольору B-V, значення якого лежать у діапазоні від 0.69 до 0.73 зор. вел. П'ять об'єктів спостерігалися до гранично

малих фазових кутів, що дало можливість уточнити для них значення абсолютних зоряних величин. Фазові залежності виміряно у трьох астероїдів групи Гільди, причому вперше були виміряні фазові залежності блиску для тіл групи Гільди типів С (Чикаго) та D (Модерлі).

Нижче, на рис. 1, представлено складені криві блиску астероїда групи Гільди (1748) Модерлі та троянця (1143) Одіссей.

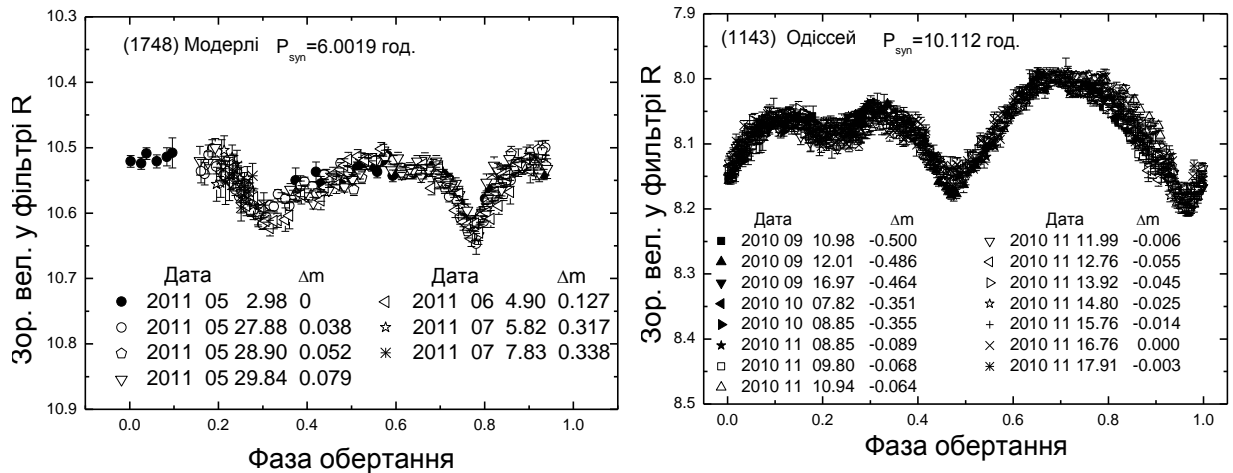


Рис. 1. Складені криві блиску двох астероїдів: (1748) Модерлі із групи Гільди та троянця (1143) Одіссей, що спостерігалися.

Підбиваючи підсумки розділу, слід зазначити, що хоча обрана методика вибору об'єктів спостереження дала змогу дослідити представників групи Гільди та троянців Юпітера максимально різноманітних за своїми властивостями, що допомагає тим самим скласти уявлення про ці групи у цілому, через віддаленість досліджуваних популяцій спостерігались переважно великі тіла із діаметром більше 40 км.

Оскільки у обох групах малих тіл, що є предметом цього дослідження, домінують представники типів P та D із невеликою часткою тіл С-типу, а у зовнішній частині головного поясу навпаки переважають тіла С-типу, а тіла типів P та D зустрічаються дуже рідко, виникає питання: наскільки тіла одного і того ж типу на різних геліоцентричних відстанях близькі за фізичними властивостями? Так, показано, що вперше отримана фазова залежність блиску представника С-типу у групі Гільди не відрізняється в межах похибок від залежностей астероїдів цього ж типу із головного поясу. Подібність між представником С-типу із групи Гільди і астероїдами цього типу головного поясу підтверджується близькістю показників кольору і величиною альbedo. Аналогічний висновок можна зробити і для тіл P-типу. На жаль, відсутні фазові залежності блиску, виміряні у максимально доступному діапазоні фазових кутів, включаючи ділянку опозиційного ефекту, для астероїдів типу D із головного поясу, як і не проводилися аналогічні вимірювання представників С-типу серед троянців. Це важливе завдання для подальших досліджень.

Отримані зі спостережень величини періодів обертання та амплітуд кривих блиску увійшли до Міжнародної бази даних "The Asteroid Lightcurve Database" і в подальшому можуть використовуватись для визначення форми астероїдів та орієнтації осей їх обертання у просторі. Детальні фазові залежності блиску троянців та астероїдів групи Гільди, вперше отримані в цій роботі, вказують на високий ступінь однорідності цих двох груп за оптичними властивостями, що дозволяє рекомендувати використовувати лінійну апроксимацію для більш точного передбачення блиску при складанні ефемерид.

Розділ 4. Аналіз даних та інтерпретація результатів спостережень. У першому підрозділі детально описано механізми, що формують фазові залежності блиску астероїдів, та найбільш розповсюджені теоретичні моделі взаємодії світла із шорсткими поверхнями безатмосферних тіл (моделі Хапке, Люмме–Боуелла, Акімова, Шкуратова), що використовуються для аналізу їх фазових залежностей блиску. Проаналізовано, при яких значеннях параметрів моделей фазова залежність блиску може бути лінійною на малих фазових кутах та які обмеження на фізичні властивості частинок поверхневого шару астероїдів це накладає. Із проведеного аналізу випливає, що на поверхнях троянців Юпітера та астероїдів групи Гільди можуть домінувати великі у порівнянні із довжиною хвилі і не гранично щільно упаковані частинки, які сильно поглинають світло у широкому діапазоні довжин хвиль і відповідно мають малі альbedo, що пригнічує практично повністю ефекти багатократного розсіяння. Останнє положення підтверджується зазначеним у третьому розділі фактом майже плоскої залежності показників кольору B-V та V-R від фазового кута.

У другому підрозділі порівнюються фазові залежності блиску троянців Юпітера, тіл групи Гільди, астероїдів головного поясу та кентаврів. На рис. 2 показано фазові залежності троянців і групи Гільди, видно, що тільки С-тип відрізняється, а фазові залежності типів Р і D поверхонь співпадають із точністю до похибок спостережень.

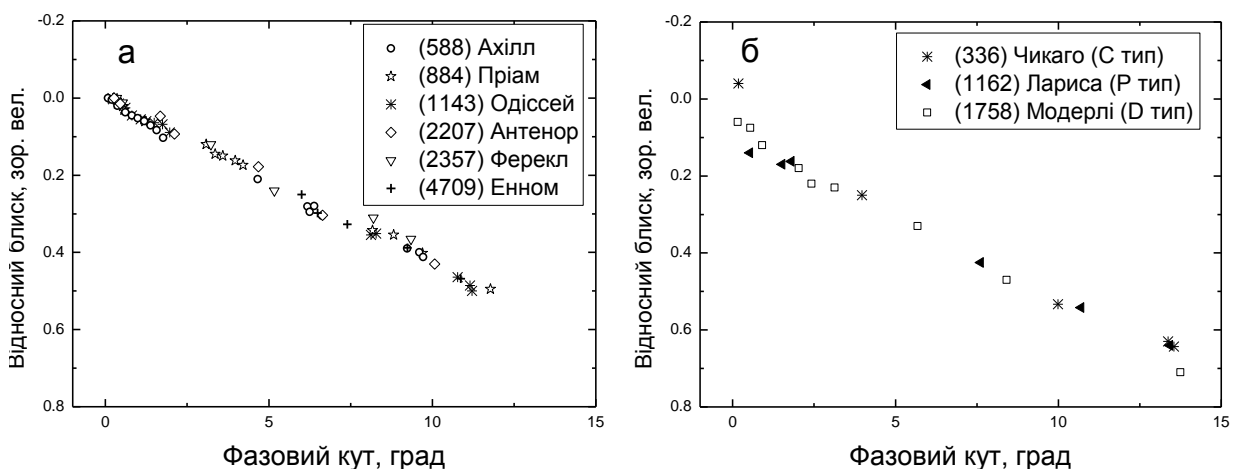


Рис. 2. Порівняння фазових залежностей блиску троянців Юпітера (а) і астероїдів групи Гільди (б), отриманих в цій роботі.

Показано, що хід фазових залежностей блиску астероїдів групи Гільди і троянців Юпітера істотно відрізняється від фазових залежностей кентаврів і збігається з фазовими залежностями астероїдів головного поясу тих самих композиційних типів.

У третьому підрозділі описано результати проведеного критичного аналізу визначення альbedo та діаметрів за даними супутникових радіометричних оглядів WISE, Akari, Spitzer, IRAS. У цьому підрозділі описано основні теплові моделі, що використовуються для обчислення діаметрів та альbedo астероїдів за вимірюваннями потоків їх власного теплового випромінювання. На прикладі троянця (4709) Енном показано, що його відносно велике альbedo ($p_v = 19\%$) є помилковим, а коректний перерахунок альbedo на основі діаметра, визначеного за покриттям цим астероїдом зорі та отриманою абсолютною зоряною величиною дає типову для троянців Юпітера величину альbedo 5.4%. Показано, що якщо типові похибки у визначенні діаметрів радіометричним методом становлять 20–25% (і істотно вище у тіл з великою амплітудою кривої блиску), то у альbedo вони можуть сягати 60%. Це пов'язано з тим, що для обчислення альbedo у всіх радіометричних оглядах використовувалися абсолютні зоряні величини з бази Центру малих планет, які обчислюються із використанням нелінійної HG-функції на основі оцінок блиску при астрометричних спостереженнях, які не відповідають критеріям якісної фотометрії. Порівняння абсолютних зоряних величин, отриманих в нашій роботі зі значеннями, що містяться у базі Центру малих планет, показало, що використана у цій базі даних методика призводить до їх систематичного завищення, тобто не є коректною. Крім того, має місце систематична різниця між альbedo, обчисленими із використанням різних теплових моделей.

У четвертому підрозділі побудовано та проаналізовано розподіли троянців та тіл групи Гільди за частотами осьового обертання. За час роботи над темою дисертації кількість відомих періодів обертання троянців Юпітера зросла майже вдвічі: з 75 до 131. Для групи Гільди кількість відомих періодів зросла тільки за рахунок виконаних у нашій роботі спостережень на 10%. Крім групи Гільди та троянців Юпітера, для порівняння були взяті астероїди зовнішньої частини головного поясу та тіла поясу Койпера разом із кентаврами. Для порівняльного аналізу були відібрані тіла діаметром більше 40 км, період обертання яких не перевищує 100 годин. Відхилення від закону Максвелла, який був використаний для апроксимації розподілів частот обертання, для астероїдів головного поясу та кентаврів разом із тілами поясу Койпера не перевищують 10%. Для троянців розподіл за частотами обертання відрізняється від максвеллівського. Зокрема, звертає на себе увагу надлишок тіл, що роблять оберт навколо своєї осі більше ніж за добу, також помітно меншою є кількість тіл із періодами 8–12 годин.

П'ятий підрозділ висвітлює проблему асиметрії між групами L_4 та L_5 серед троянців Юпітера. Згідно рівнянь небесної механіки [21] умови руху навколо обох трикутних точок лібрації L_4 та L_5 повністю однакові, тобто динаміка тіл симетрична відносно заміни L_4 на L_5 , та навпаки. Однак має

місце відмінність у кількості тіл, що належать до L_4 та L_5 . Цю різницю не можливо приписати впливу спостережної селекції, оскільки вона залишається також, якщо розглядати лише яскраві троянці, повнота відкриття яких понад 90%.

Детальний аналіз розподілу нахилів орбіт троянців, який показано на рис. 3, дозволив нам виявити ще одну відмінність між групами L_4 і L_5 . Аналізуючи також лише яскраві троянці, на які вже не впливає спостережна селекція, ми вперше виявили статистично значущу відмінність у розподілі нахилів орбіт. За тестом Колмогорова–Смирнова із ймовірністю 99% гіпотеза про те, що нахили орбіт тіл із L_4 і L_5 є вибірками із однієї і тієї самої генеральної сукупності, відкидається. Два прояви асиметрії, що описані, безумовно, слід розглядати як реально існуючі, та вони повинні братись до уваги при вдосконаленні існуючих моделей динамічної еволюції та при розробці нових гіпотез про походження троянців.

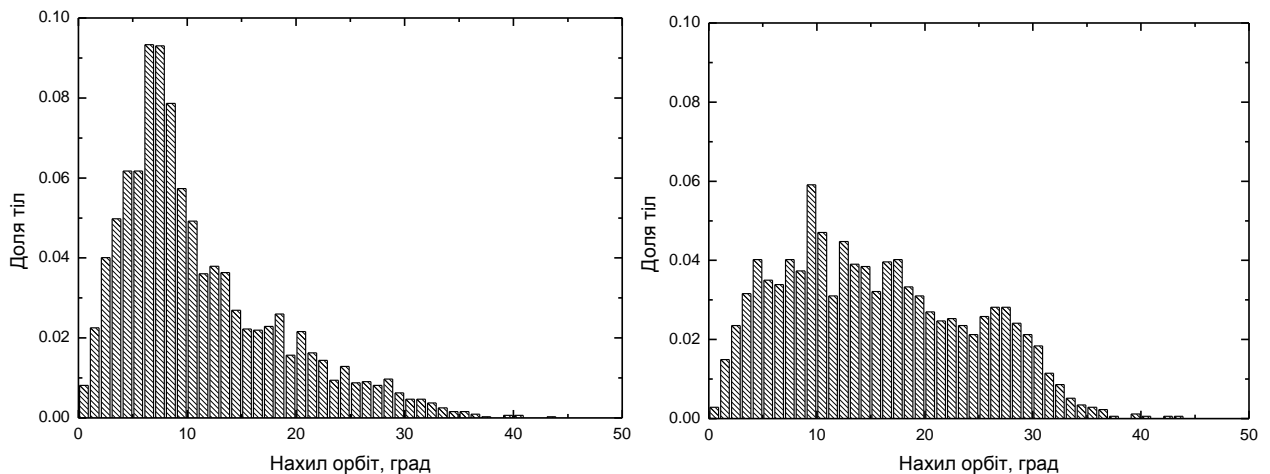


Рис. 3. Розподіл троянців, що належать групам L_4 (ліворуч) і L_5 (праворуч), за нахилами орбіт.

У п'ятому підрозділі детально проаналізовано розвиток за останні роки гіпотез про походження троянців Юпітера та обґрунтованість їх висновків. Слід зазначити, що гіпотеза хаотичного захвату троянців [26] не була від початку самостійною, а з'явилася як частина більш глобальної моделі, створеної для пояснення сучасних особливостей динамічної будови Сонячної системи. З моменту її появи пройшло 10 років, і за цей час, зіткнувшись із рядом проблем, модель суттєво еволюціонувала. Замість механізму хаотичного захвату був запропонований механізм [28] захоплення під час флуктуацій величини великої півосі Юпітера через гравітаційний вплив гіпотетичної п'ятої планети-гіганта, яка потім була викинута із Сонячної системи. Однак, не дивлячись на таку зміну початкових умов, джерело тіл, які були захоплені на троянські орбіти, лишилось тим самим. Тому висновок про схожість фізичних властивостей між сучасною популяцією тіл поясу Койпера і динамічно пов'язаними із нею кентаврами та троянцями Юпітера і групою Гільди наштотується на ряд проблем. На відміну від кентаврів та

тіл поясу Койпера, які є дуже неоднорідними за оптичними характеристиками, троянці та група Гільди демонструють надзвичайну однорідність. Так, розподіл альbedo кентаврів та тіл поясу Койпера у порівнянні із представниками двох досліджуваних груп помітно ширший як за показниками кольору, так і за параметрами фазових залежностей блиску. Тому сукупність наявних даних про фізичні і динамічні властивості троянців Юпітера і астероїдів групи Гільди не узгоджується з припущенням про схожість їх із об'єктами поясу Койпера і кентаврами. Порівняння із астероїдами головного поясу показало, що за параметрами фазових залежностей троянці Юпітера не відрізняються від них.

У шостому підрозділі йде мова про відкриті питання та невирішені проблеми у дослідженнях троянців Юпітера і групи Гільди та можливі напрями майбутніх досліджень, необхідних для їх розв'язання. До перших віднесено причину асиметрії між групами L_4 і L_5 та пошук нових її проявів, пошук подвійних систем серед групи Гільди, дослідження яких дасть можливість визначити густину тіл цієї групи, визначення хімічного складу поверхні тіл типів P та D, що домінують серед досліджуваних популяцій. До других слід включити перевірку знайденої бімодальності троянців за спектрами у ближній інфрачервоній області та пошук її прояву у інших фізичних параметрах, а також пошук аналогічної бімодальності серед тіл групи Гільди.

У додатку наведено інформацію про аспектні дані астероїдів, що спостерігалися: дата та середній момент спостережень, екліптичні довгота та широта, геліо- та геоцентричні відстані, фазовий кут, зоряні величини у фільтрах R та V.

ВИСНОВКИ

Дисертація присвячена дослідженню фізичних властивостей двох резонансних популяцій малих тіл Сонячної системи: троянців Юпітера та групи Гільди, за даними наземних фотометричних спостережень, а також перевірці узгодженості основних положень та наслідків гіпотез про походження цих двох груп із наявною сукупністю даних щодо їх фізичних та динамічних характеристик. Для вирішення поставленої задачі був отриманий значний спостережний матеріал у 2007–2013 роках, в основному на 0.7-м рефлекторі АЗТ-8 Чугуївської спостережної станції НДІ астрономії ХНУ імені В. Н. Каразіна протягом 167 ночей, в які спостерігалися 11 троянців Юпітера і 12 об'єктів групи Гільди. Була використана методика обробки даних фотометричних спостережень, що відпрацьована в ході багаторічного досвіду співробітниками відділу фізики астероїдів і комет НДІ астрономії ХНУ імені В.Н. Каразіна. Такий підхід дав змогу отримати наступні нові результати:

1. Вперше з високою точністю виміряно фазові залежності блиску троянців Юпітера у максимально доступному діапазоні фазових кутів і знайдено, що в усіх цих тіл відсутнє нелінійне зростання блиску аж до гранично

малих фазових кутів (0.1° – 0.4°). Вперше виміряно фазові залежності тіл Р і D типів у групі Гільди. Показано, що за величиною фазового коефіцієнта астероїди групи Гільди типів Р і D та троянці Юпітера істотно відрізняються від кентаврів, а фазова залежність блиску у межах похибок спостережень співпадає у цих тіл із астероїдами головного поясу аналогічних композиційних типів.

2. Виконано порівняльний аналіз баз даних альbedo та діаметрів астероїдів, розрахованих за результатами космічних радіометричних оглядів WISE, Akari, Spitzer, IRAS, і показано, що величини альbedo троянців і астероїдів групи Гільди систематично завищені через використання абсолютних зоряних величин бази даних Центру малих планет, отриманих за допомогою HG-функції. Розбіжності між значеннями діаметра для одного і того самого астероїда із різних радіометричних оглядів може сягати 20–30%, а для деяких об'єктів 100%. У випадку альbedo величина розбіжності залежить від використаної теплової моделі. Так, порівняння альbedo, розрахованих за допомогою стандартної теплової моделі в оглядах Akari та IRAS, показує значно меншу розбіжність, ніж при порівнянні значень альbedo цих двох оглядів із WISE, у якому використана модель NEATM із додатковим вільним параметром.
3. Виміряні фазові залежності блиску троянців з груп L_4 і L_5 збігаються з точністю до похибок вимірювань, що вказує на високий ступінь однорідності всієї популяції за оптичними властивостями. Однорідність троянців за іншими параметрами (показники кольору, розподіл за типом, альbedo) і близькість їх фізичних властивостей і властивостей астероїдів групи Гільди типів Р і D вказують на схожість їх еволюційних шляхів. Запропоновано, виходячи із однорідності троянців за оптичними властивостями, при складанні ефемерид і для отримання абсолютної зоряної величини троянців і астероїдів групи Гільди типів Р і D використовувати лінійну функцію з нахилом 0.043 ± 0.002 зор.вел./град. замість стандартної HG-функції.
4. Вперше виявлено статистично значущу відмінність у розподілах нахилів орбіт троянців, які належать групам L_4 і L_5 , що повинно враховуватися в моделях, які описують походження і динамічну еволюцію троянців Юпітера.
5. Аналіз сукупності накопичених даних про фізичні і динамічні властивості троянців Юпітера дає змогу припустити, що найімовірніше вони є реліктовими тілами, а не захопленими із зовнішньої частини протопланетного диска на ранній стадії еволюції Сонячної системи.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації в наукових фахових журналах:

1. Vokrouhlický D. Datura family: The 2009 update / Vokrouhlický D., Āurech J., Michałowski T., Krugly Yu. N., Gaftonyuk N. M., Kryszczyńska A., Colas F.,

- Lecacheux J., Molotov I., **Slyusarev I.**, Polińska M., Nesvorný D., Beshore E. // *Astronomy and Astrophysics*. – 2009. – Vol. 507, Iss. 1. P. 495–504.
2. Shevchenko V. G. Opposition effect of Trojan asteroids / Shevchenko V. G., Belskaya I. N., **Slyusarev I. G.**, Krugly Yu. N., Chiorny V. G., Gaftonyuk N.M., Donchev Z., Ivanova V., Ibrahimov M. A., Ehgamberdiev Sh. A., Molotov I. E. // *Icarus*. – 2012. – Vol. 217, Iss. 1. – P. 202–208.
 3. Āurech J. Analysis of the rotation period of asteroids (1865) Cerberus, (2100) Ra-Shalom, and (3103) Eger – search for the YORP effect / Āurech J., Vokrouhlický D., Baransky A. R., Breiter S., Burkhonov O. A., Cooney W., Fuller V., Gaftonyuk N. M., Gross J., Inasaridze R. Ya., Kaasalainen M., Krugly Yu. N., Kvaratshelia O. I., Litvinenko E. A., Macomber B., Marchis F., Molotov I. E., Oey J., Polishook D., Pollock J., Pravec P., Sárneczky K., Shevchenko V. G., **Slyusarev I.**, Stephens R., Szabó Gy., Terrell D., Vachier F., Vanderplate Z., Viikinkoski M., Warner B. D. // *Astronomy and Astrophysics*. – 2012. – Vol. 547. – id.A10. – 9 pp.
 4. **Слюсарев И.Г.** Результаты фотометрии избранных астероидов группы Гильды / Слюсарев И.Г., Шевченко В.Г., Бельская И.Н., Круглый Ю.Н., Черный В.Г. // *Вісник Астрономічної Школи*. – 2013. – Т. 9, №1. – С.75–79.
 5. Shevchenko V.G. Revised Albedos of Trojan asteroids (911) Agamemnon and (4709) Ennomos / Shevchenko V.G., **Slyusarev I.G.**, Belskaya I.N. // *Meteoritics and Planetary Science*. – 2014. – Vol. 49, No. 1. – P.103–108.
 6. **Слюсарев И.Г.** Троянцы Юпитера: физические свойства и происхождение / Слюсарев И.Г., Бельская И.Н. // *Астрономический вестник*. – 2014. – Т.48. №2. – С.149–168.

Матеріали та тези конференцій:

7. **Slyusarev I. G.** Asymmetry between the L₄ and L₅ Swarms of Jupiter Trojans / Slyusarev I. G. // 44th Lunar and Planetary Science Conference, held March 18–22, 2013 in The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1719, P.2223.
8. **Slyusarev I.** CCD photometry of selected outer-belt asteroids: Similarity of magnitude-phase dependencies among the Jupiter Trojan, Hilda, and Cybele asteroids / Slyusarev I., Shevchenko V., Belskaya I. // Conference abstract "Asteroids, Comets, Meteors". – Helsinki, 2014.
9. Shevchenko V. G. Do Trojan Asteroids Have the Brightness Opposition Effect? / Shevchenko V. G., Krugly Yu. N., Belskaya I. N., Chiorny V. G., Gaftonyuk N.M., **Slyusarev I.G.**, Tereschenko I.A., Donchev Z., Ivanova V., Borisov G., Ibrahimov M.A., Marshalkina A.L., Molotov I.E. // 40th Lunar and Planetary Science Conference, March 15–19, 2009. – Houston, Abstract №1391.
10. **Слюсарев И.Г.** Физические свойства астероида-троянца 588 Ахилл / Слюсарев И.Г., Гафтонюк Н.М., Круглый Ю.Н., Шевченко В.Г., Бельская И.Н. // Міжнародна наукова конференція "Астрономічна школа молодих вчених". Україна, Херсон, 26–29 травня 2009 р. – С. 36–37.

11. **Слюсарев И.Г.** Физические свойства и происхождение троянцев Юпитера // "Astronomy and Space Physics in Taras Shevchenko National University of Kyiv" International Conference dedicated to 165-th Anniversary of Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv and 105-th Anniversary of S. K. Vsekhsvyatsky. – Kyiv (Ukraine), May 24–28, 2010.
12. **Slyusarev I.G.** Relationship between polarimetric and photometric phase curves of asteroids / Slyusarev I.G., Belskaya I.N., Shevchenko V.G. // NATO Advanced Study Institute conference on "Special Detection Technique (Polarimetry) and Remote Sensing", Kyiv, Ukraine, 12–25 September 2010.
13. **Слюсарев И.Г.** Исследование физических свойств астероидов-троянцев Юпитера по результатам многоцветной ПЗС фотометрии / Слюсарев И.Г., Шевченко В.Г., Бельская И.Н. // Девятая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – Москва, ИКИ РАН, 14–18 ноября 2011 г.
14. **Slyusarev I.G.** Magnitude Phase Angle Dependences of Jupiter Trojans and Hilda Asteroids /Slyusarev I.G., Shevchenko V.G., Belskaya I.N., Krugly Yu. N., Chiorny V.G. // 43rd Lunar and Planetary Science Conference, LPI Contribution No. 1659, id.1885.
15. Shevchenko V.G. Albedo of the Trojan Asteroid 4709 Ennomos / Shevchenko V.G., **Slyusarev I.G.**, Belskaya I.N. // "Asteroids, Comets, Meteors". – 2012, Proceedings of the conference. LPI Contribution No. 1667, id.6105.
16. **Slyusarev I.G.** CCD Photometry of Hilda Asteroids/ Slyusarev I.G., Shevchenko V.G., Belskaya I.N., Krugly Yu.N., Chiorny V.G. // "Asteroids, Comets, Meteors". – 2012, Proceedings of the conference. LPI Contribution No. 1667, id.6398.
17. **Slyusarev I.G.** Revising of Jupiter Trojans albedos, sizes and densities / Slyusarev I.G., Shevchenko V.G., Belskaya I.N., Krugly Yu. N, Chiorny V. G. // 19th Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics, Kiev, Ukraine April 23–28, 2012.
18. Shevchenko V.G. Influence of Collision on Magnitude Phase Angle Dependence of Asteroid (596) Scheila / Shevchenko V.G., **Slyusarev I.G.**, Belskaya I.N., Chiorny V.G. // 44th Lunar and Planetary Science Conference, held March 18–22, 2013 in The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 1719, P.2706
19. **Слюсарев И.Г.** Физические свойства избранных троянцев Юпитера и астероидов группы Гильды по данным ПЗС-фотометрии / Слюсарев И.Г., Шевченко В.Г., Бельская И.Н., Круглый Ю.Н., Черный В.Г. // Міжнародна наукова конференція "Астрономічна школа молодих вчених". Україна, Херсон, 12–14 травня 2013 р. – С. 20.
20. Shevchenko V. Asteroids without opposition effect / Shevchenko V., Belskaya I., **Slyusarev I.** // Conference abstract "Asteroids, Comets, Meteors". – Helsinki, 2014.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

21. Маркеев А.П. Точки либрации в небесной механике и космодинамике М.: Наука, 1978.–378 с.
22. Barucci M.A. Physical properties of Trojan and Centaur asteroids / Barucci M.A., Cruikshank D.P., Mottola S., and Lazzarin M. // Asteroids III / Ed. Bottke W. F. Jr. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. – P. 273–287.
23. Dahlgren M. A study of Hilda asteroids. VI. Analysis of the Lightcurve Properties / Dahlgren M. Lahulla J. F., Lagerkvist C.-I. // Icarus, 1999. – V. 138, Issue 2, – P. 259–267.
24. Dotto E. De Troianis: The Trojans in the Planetary System / Dotto E., Emery J.P., Barucci M.A., Morbidelli A., Cruikshank D.P. // The Solar System Beyond Neptune / Ed. Barucci M.A. Tucson: Univ. of Arizona Press, 2008. – P. 383–395.
25. Marzari F. Origin and Evolution of Trojan Asteroids / Marzari F. Scholl H., Murray C., Lagerkvist C. // Asteroids III / Ed. Bottke W. F. Jr. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P.725–738.
26. Morbidelli A. Chaotic capture of Jupiter’s Trojan asteroids in the early solar system / Morbidelli A., Levison H.F., Tsiganis K., Gomes R. // Nature, Letters. – 2005. – V. 435. – P. 462–465.
27. Mottola S. Rotational Properties of Jupiter Trojans. I. Light Curves of 80 Objects / Mottola S., Di Martino M., Erikson A. // Astron. J. – 2011. – V. 141. – P. 170 – 202.
28. Nesvorny D. Capture of Trojans by Jumping Jupiter / Nesvorny D., Vokrouhlicky D., Morbidelli A. // The Astrophysical Journal. – 2013. – V. 768, Issue 1, id. 45. 8 pp.
29. Tholen D.J. Asteroid taxonomic classifications // Asteroids II / Ed. Binzel R.P. et al., Tucson: Univ. of Arizona Press, – 1989. – P. 1139–1150.
30. Saikia S. Voyage to Troy: A mission concept for the exploration of the Trojan asteroids / Saikia S., Das A., Laipert F. et al. // 11th International Planetary Probe Workshop LPI Contribution No. 1795, – P.8076.

АНОТАЦІЯ

Слюсарев І.Г. Троянці Юпітера та група Гільди: фізичні властивості і походження. – 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, 2015.

Робота присвячена дослідженню фізичних властивостей троянців Юпітера і астероїдів групи Гільди за даними фотометричних спостережень, а також аналізу і перевірці узгодженості висновків гіпотез про походження цих двох груп із накопиченими даними про їхні фізичні і динамічні характеристики.

Вперше виміряно високоточні фазові залежності блиску троянців Юпітера. Вони збігаються між собою, практично ідентичні фазовим

залежностям астероїдів групи Гільди Р- і D-типів, але величина їх фазового коефіцієнта у три рази менша, ніж у кентаврів. Лінійність фазових залежностей аж до гранично малих кутів фази дозволяє вважати припущення про тіньовий механізм як про домінуючий при формуванні фазової залежності блиску троянців Юпітера і астероїдів групи Гільди обґрунтованим. З аналізу теоретичних моделей взаємодії світла з шорсткими поверхнями отримані деякі обмеження на властивості частинок поверхні астероїдів. Показано, що використання отриманих на основі HG-функції абсолютних зоряних величин призводить до систематичного завищення альbedo. Запропоновано використовувати лінійну фазову залежність для визначення абсолютної зоряної величини і передбачення видимого блиску для ефемеридних завдань замість стандартної нелінійної HG-функції. Вперше надійно встановлено відмінність розподілу нахилів орбіт троянців, що рухаються навколо L_4 , від троянців, що рухаються навколо L_5 . Сукупність наявних даних про фізичні і динамічні властивості троянців Юпітера і астероїдів групи Гільди дозволяє зробити припущення про реліктовість цих двох резонансних популяцій малих тіл Сонячної системи.

Ключові слова: троянці Юпітера, група Гільди, фазова залежність блиску, опозиційний ефект, альbedo, ПЗЗ-фотометрія.

АННОТАЦІЯ

Слюсарев И.Г. Троянцы Юпитера и группа Гильды: физические свойства и происхождение. – Рукопись.

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, 2015.

Работа посвящена исследованию физических свойств троянцев Юпитера и астероидов группы Гильды по данным фотометрических наблюдений, а также анализу и проверке согласованности выводов гипотез о происхождении этих двух групп с накопленными данными об их физических и динамических характеристиках. С 2009 по 2013 годы в течение 167 ночей выполнены наблюдения 23 представителей двух исследуемых резонансных групп: 12 из группы Гильды и 11 - троянцев Юпитера, из которых 7 – движутся по орбитам вокруг точки либрации L_5 , а 4 - вокруг L_4 . Для наблюдений были отобраны тела, отличающиеся как по динамическим (т.е. имеющие элементы орбит в широком диапазоне значений) так и по физическим свойствам (как с наибольшими величинами альbedo, так и с альbedo ниже среднего для данной популяции значения). Наблюдались представители всех основных композиционных типов, представленных в этих популяциях: тела С-, Р- и D-типа.

Впервые получены высокоточные фазовые зависимости блеска троянцев Юпитера. Они совпадают между собой, практически идентичны фазовым

зависимостям астероидов группы Гильды Р- и D-типов и демонстрируют отличие от фазовых зависимостей кентавров. Линейность фазовых зависимостей вплоть до предельно малых углов фазы позволяет считать обоснованным предположение о теневом механизме, как о доминирующем при формировании фазовой зависимости блеска троянцев и астероидов группы Гильды. Также, на основе аппроксимаций фазовых зависимостей теоретическими функциями Хапке, Люмме–Боуэлла и Шкуратова получены некоторые ограничения на свойства поверхностного вещества этих астероидов. А именно, высказано предположение о преобладании крупных и не предельно плотно упакованных частиц, которые обладают сильным поглощением в широком диапазоне длин волн и, соответственно, имеют малые альбедо, что приводит к подавлению эффектов многократного рассеяния. Проведенный сравнительный анализ баз данных об альбедо и диаметрах троянцев Юпитера и астероидов группы Гильды, вычисленных на основе радиометрических обзоров, выполненных космическими инфракрасными телескопами WISE, Akari, Spitzer и IRAS, показал наличие систематических отличий, предположительно связанных с различием использованных тепловых моделей. Отмечено, что из-за этого использование величин альбедо тел диаметром менее 30 км, полученных в обзоре WISE, для задач таксономической классификации может привести к ошибочным результатам. Также показано, что вычисленные на основе HG-функции абсолютные звездные величины приводят к систематическому завышению значений альбедо, рассчитанных по данным радиометрических обзоров. Предложено использовать линейную фазовую зависимость для определения абсолютной звездной величины и предсказания видимого блеска для эфемеридных задач вместо стандартной нелинейной HG-функции. Впервые надежно установлено отличие распределения наклонов орбит троянцев, движущихся вокруг L_4 , от троянцев, движущихся вокруг L_5 . Совокупность имеющихся данных о физических и динамических свойствах троянцев Юпитера и астероидов группы Гильды позволяет сделать предположение о том, что эти две резонансные группы являются реликтовыми.

Ключевые слова: троянцы Юпитера, группа Гильды, фазовая зависимость блеска, оппозиционный эффект, альбедо, ПЗС-фотометрия.

ANNOTATION

Slyusarev I.G. Jupiter Trojans and Hilda group: physical properties and origin. – Manuscript.

Thesis for a PhD degree by the specialty 01.03.03 – Heliophysics and physics of the Solar System. – The Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2015.

The work is devoted to investigation of the physical properties of Jupiter Trojans and Hilda group by photometric observations and to the analysis of predictions hypotheses about the origin of these two groups and verifying the their consistency

with the accumulated data on their physical and dynamic properties. For the first time measured of well-sampled magnitude phase curves of Jupiter Trojans. They have almost identical linear phase dependences with an absence of noticeable nonlinear opposition surge at small phase angles similar with P and D type Hilda asteroids. At the same time, mean slope of their phase curves is in three times smaller than the centaurs. Such magnitude phase angle behaviour is different from majority small Solar system bodies showing non-linear phase curve behaviour close to opposition. An absence of opposition surge can be explained by very dark surfaces of these objects for which only single light scattering is important. The linearity of the magnitude phase dependence up to extremely low phase angles suggests the assumption of the shadowing mechanism as dominant. From the analysis of theoretical models of the interaction of light with a rough surface, we obtained some restrictions on the surface properties of these asteroids. Was shown that using the HG-function to obtain the absolute magnitude lead to the albedo systematic overestimation. Proposed to use linear phase dependence to determination of absolute magnitude and in ephemeris instead of the standard nonlinear HG-functions. For the first time was found that Trojans, moving around L_4 is firmly distinguished from Trojans, moving around L_5 in orbital inclination distribution. The available amount of data on the physical and dynamical properties of Hilda group asteroids and Jupiter Trojans is consistent with assumption that these two resonant populations of small bodies of the Solar System are primordial.

Key words: Jupiter Trojans, Hilda group, the magnitude – phase dependence, opposition effect, albedo, CCD photometry.