НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Громакіна Тетяна Андріївна

УДК 523.44 +520.82

ФОТОМЕТРІЯ ТА СПЕКТРОФОТОМЕТРІЯ ВИБРАНИХ МАЛИХ ТІЛ ЗОВНІШНЬОЇ ОБЛАСТІ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

спеціальність 01.03.03 – «Геліофізика і фізика Сонячної системи»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана у 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,
НДІ астрономії
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна МОН України,
завідувач відділу фізики астероїдів і комет.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Відьмаченко Анатолій Петрович,
Головна астрономічна обсерваторія НАН України,
в. о. головного наукового співробітника;

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 «15» листопада 2019 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 «11» жовтня 2019 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук І. Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Відкриття транснептунових об’єктів (ТНО) суттєво змінило наше уявлення про межі та структуру Сонячної системи. Зокрема, відкриття відносно великих транснептунових тіл, що є співрозмірними Плутону, призвело до виділення нового класу об’єктів – карликових планет. Наразі до карликових планет віднесені найбільший астероїд головного поясу (1) Церера та чотири транснептунових тіла: (134340) Плутон, (136108) Гаумеа, (136199) Ерида та (136472) Макемаке. Згідно сучасних гіпотез формування та еволюції Сонячної системи троянці Юпітера та кентаври вважаються асоційованими з ТНО популяціями [22].

Малі за розміром тіла, що були сформовані та знаходяться в зовнішній області Сонячної системи, зазнали мінімального термічного впливу і, таким чином, зберегли первинну речовину, з якої формувалися тіла Сонячної системи. Тому дослідження фізичних властивостей малих тіл, що сформувалися на різних відстанях від Сонця, можуть наблизити нас до кращого розуміння структури Сонячної системи на ранніх етапах її формування та еволюції Сонячної системи в цілому.

З іншого боку, через велику відстань до Землі малі тіла зовнішньої області Сонячної системи вивчені значно гірше, ніж представники головного поясу астероїдів. Дані про їх фізичні властивості накопичуються дуже повільно. Властивості осьового обертання, що містять важливу інформацію про первинний розподіл кутового моменту, а також про історію зіткнень представників різних динамічних груп, відомі для менше ніж 6% відкритих тіл зовнішньої області Сонячної системи.

Для спектральних спостережень, які надають нам найбільш детальну інформацію щодо поверхневого складу речовини цих об'єктів, досяжними є лише великі за розміром транснептунові тіла. Через це дані спектральних спостережень були отримані для ще меншого числа об’єктів, ніж фотометричні дані. Накопичення даних про фізичні властивості представників різних динамічних груп та їх порівняння є вкрай важливими для вивчення еволюції речовин, що знаходяться на поверхнях цих тіл.

Все це і визначає важливість та актуальність вивчення малих тіл зовнішньої області Сонячної системи за допомогою як фотометричних, так і спектрофотометричних спостережень.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Представлені в дисертації дослідження виконувалися у межах наступних наукових тем НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна:

– “Фізичні властивості малих тіл Сонячної системи за даними телескопічних досліджень та чисельного моделювання” (2013−2015), № держ. реєстрації 0112U006958. Автор брала участь як виконавець.

– “Фотометричні і поляриметричні дослідження астероїдів головного поясу, комет та транснептунових об'єктів” (2016−2018), № держ. реєстрації 0116U000832. Автор брала участь як виконавець.

– “Фізичні властивості астероїдів на орбітах поблизу орбіти Землі за результатами спостережень і чисельного моделювання” (2018–2020), № держ. реєстрації 0117U000482. Автор брала участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є вивчення фізичних властивостей малих тіл зовнішньої області Сонячної системи за даними фотометричних та спектрофотометричних спостережень.

Згідно зі сформульованою метою, були поставлені та вирішені наступні **завдання**:

1. Проведення фотометричних спостережень карликової планети (136472) Макемаке з метою визначення параметрів її осьового обертання.
2. Визначення властивостей та складу речовини поверхні Макемаке за даними спектрофотометричних спостережень.
3. Визначення параметрів обертання вибраних ТНО та кентаврів.
4. Вивчення властивостей поверхонь вибраних троянців Юпітера за даними спектрофотометричних спостережень.
5. Створення бази даних спектральних спостережень транснептунових об’єктів і кентаврів та отримання усереднених спектрів для різних таксономічних типів цих тіл.
6. Проведення порівняльного аналізу параметрів осьового обертання малих тіл зовнішньої області Сонячної системи і пошуку можливої кореляції між фізичними та обертальними характеристиками цих тіл.

Об'єктами дослідження є малі тіла зовнішньої області Сонячної системи: троянці Юпітера, кентаври та транснептунові об’єкти.

Предмет дослідження – фізичні властивості троянців Юпітера, кентаврів та транснептунових об’єктів.

Методи дослідження – ПЗЗ-фотометрія, спектральні спостереження, чисельне моделювання, порівняльний аналіз.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. За результатами довгострокових фотометричних спостережень у 2006–2017 рр. визначено період осьового обертання карликової планети Макемаке, що виявився значно довшим, ніж вважалося раніше. Вперше виявлено асиметрію кривої блиску Макемаке, що свідчить про наявність відхилень форми цього тіла від сферичної. Вперше показано, що абсолютна зоряна величина та амплітуда кривої блиску не змінювалися на часовому проміжку від моменту відкриття цієї карликової планети.

2. За результатами спектральних спостережень Макемаке у видимому та ближньому інфрачервоному (ІЧ) діапазонах на різних фазах обертання в 2006–2013 рр. вперше показано однорідність складу поверхні Макемаке. За даними спектрального моделювання запропоновано найбільш імовірний склад поверхні Макемаке, що містить переважно льоди метану (65%) та етану (24%), а також домішки інших продуктів опромінення метану.

3. Зроблено оцінки періодів обертання та амплітуд кривих блиску для десяти транснептунових тіл та кентаврів, з них для п’яти об’єктів – (148975) 2001 XA255, (281371) 2008 FC76, (315898) 2008 QD4, 2008 CT190 та 2016 ND21 – це перші вимірювання кривих блиску, для п’яти інших – періоди обертання визначені з більшою точністю, ніж ті, що були одержані раніше іншими авторами.

4. Вперше було досліджено ступінь однорідності поверхонь троянців Юпітера за результатами спектральних спостережень у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах двох найбільших троянців (624) Гектор та (911) Агамемнон. Показано, що поверхні цих тіл є однорідними, подібними за складом і не мають спектральних ознак наявності водяного льоду. За результатами моделювання зроблено оцінку верхньої граничної межі можливої кількості водяного льоду на їх поверхнях (< 3–5%).

5. Створено базу даних спектральних спостережень транснептунових об’єктів та кентаврів, в якій за допомогою показників кольору, виміряних у широкосмугових фотометричних фільтрах R, I, J, H, K системи Джонсона–Козінса, поєднано неодночасні спектральні спостереження у видимому та ближньому ІЧ-діапазонах. Вперше отримано усереднені спектри для кожного таксономічного класу ТНО, що можуть бути використані для калібрування спостережень у різних фотометричних системах.

6. Вперше показано, що періоди осьового обертання представників динамічного класу резонансних транснептунових тіл у середньому менші, ніж середні періоди обертання представників класичних транснептунових об’єктів та об'єктів розсіяного диска.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність дисертаційної роботи обумовлена значною кількістю оригінальних фотометричних та спектральних спостережень, які в подальшому можуть бути використані для вивчення фізичних властивостей віддалених малих тіл, а також для порівняльного аналізу з іншими популяціями малих тіл Сонячної системи. А саме:

– отримані криві блиску ТНО та кентаврів в подальшому можуть бути використані для визначення орієнтації осі обертання і моделювання їх форми;

– отримані дані про фізичні властивості та оцінки складу поверхонь троянців Юпітера можуть бути використані при плануванні майбутніх космічних місій;

– створена база даних спектральних спостережень транснептунових об’єктів та кентаврів може бути використана для перерахунку показників кольору в різних фотометричних системах;

– створена комп’ютерна програма може бути використана для отримання модельних спектрів малих безатмосферних тіл.

Достовірність і обґрунтованість результатів досліджень. Достовірність результатів фотометричних та спектральних спостережень підтверджується використанням відпрацьованої методики спостережень та обробки даних, а також узгодженням з даними спостережень інших авторів у всіх випадках, де такі дані існують. Модель Шкуратова [29], що використовувалася для отримання модельних

спектрів, є однією з найбільш розповсюджених і часто використовуваних моделей, що довела свою ефективність. Результати досліджень апробовано у рецензованих фахових міжнародних журналах, а також на міжнародних наукових конференціях та семінарах.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертації викладені в роботах [1–6]. Зокрема, автору належить наступне:

– у роботі [1] автору належить постановка задачі, проведене спектральне моделювання, аналіз результатів і написання тексту статті;

– у роботі [2] автором було оброблено дані спектральних спостережень, проведено спектральне моделювання, пораховано зсуви спектральних ліній поглинання. Також автор приймала участь у аналізі результатів та написанні тексту статті;

– у роботі [3] автором було зібрано існуючі літературні дані спектральних і фотометричних спостережень для транснептунових об'єктів та кентаврів і за показниками кольору поєднано спектри у ближньому та ІЧ-діапазонах. Також автор брала участь у аналізі результатів та написанні тексту статті;

– у роботі [4] автором було проведено аналіз даних фотометричних спостережень, пошук періодів обертання та написано текст статті;

– у роботі [5] автору належить обробка спектральних спостережень та їх моделювання. Також автор брала участь у написанні тексту статті;

– у роботі [6] автору належить постановка задачі, обробка та аналіз даних фотометричних спостережень, а також написання тексту статті.

Апробація результатів дисертації.

Результати дисертації було представлено на:

– Міжнародній конференції "21th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics" (Київ, 28 квітня–3 травня 2014 р.);

– X Барабашовських наукових читаннях з астрономії (Харків, 28 березня 2015 р.);

– Міжнародній конференції «Asteroids, Comets, Meteors» (Монтевідео, Уругвай, 10–14 квітня 2017 р.);

– Міжнародній конференції "24th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics" (Київ, 24–29 квітня 2017 р.);

– Міжнародній конференції "Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology" (Одеса, 13–20 серпня 2017 р.);

– Міжнародній конференції «European Planetary Science Congress» (Рига, Латвія, 17–22 вересня 2017 р.);

– Міжнародній конференції «Atmosphereless Solar System bodies in the space exploration era» (Харків, 18–22 червня 2018 р.);

– Міжнародній конференції «European Planetary Science Congress» (Берлін, Німеччина, 16–21 вересня 2018 р.);

– наукових семінарах НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна та Головної астрономічної обсерваторії НАН України.

Публікації. Основні результати дисертації викладено у 6 статтях у міжнародних та українських фахових наукових журналах [1–6] та у 8 тезах міжнародних конференцій [7–14].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та трьох додатків. Загальний обсяг роботи – 178 сторінок, у тому числі список літератури зі 209 найменувань. Робота ілюстрована 51 рисунком та містить 11 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** наведено обґрунтування актуальності теми дисертації, визначено мету і задачі дослідження та методи розв'язання цих задач. Наведено зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, наукову новизну дослідження та практичне значення отриманих результатів. Також визначено особистий внесок автора, відомості щодо апробації роботи та публікацій за темою дисертації.

Розділ 1 "Дослідження малих тіл зовнішньої області Сонячної системи" присвячено огляду літератури за темою дисертації, а також окреслено коло задач, що вирішувались у дисертаційній роботі.

В *першому підрозділі* наведено загальну характеристику та класифікацію малих тіл зовнішньої області Сонячної системи за орбітальними параметрами. Серед транснептунових об'єктів за динамічними характеристиками виділяють *класичні* об'єкти, що мають майже кругові орбіти з низькими нахилами, *резонансні* ТНО, які знаходяться в орбітальному резонансі з Нептуном, та *об'єкти розсіяного диска* і *відокремлені* ТНО, що мають високі ексцентриситети та високі нахили орбіт. Великі півосі транснептунових об'єктів є більшими за ~30 а. о. Троянці Юпітера і кентаври знаходяться ближче до Сонця та мають великі півосі в діапазоні 5–30 а. о. Кількість відкритих ТНО, кентаврів та троянців Юпітера перевищує 10 000 об'єктів (на початок 2019 року). Відмічено, що накопичення спостережних даних для вивчення фізичних властивостей різних динамічних популяцій малих тіл є актуальною проблемою.

У *другому підрозділі* описано відомі фізичні властивості карликових планет поясу Койпера. Завдяки своєму розміру, ці тіла є найбільш вивченими об'єктами у транснептуновому регіоні. Кожна з карликових планет за своїми динамічними та фізичними властивостями є по-своєму унікальною. Спектри цих об'єктів мають достатньо глибокі смуги поглинання льодів різного складу та високе альбедо, що обумовлене великою кількістю льоду на поверхні. Карликові планети є досить масивними для втримання на своїй поверхні летючих речовин, таких як азот, метан та деякі продукти опромінення метану [27]. Спектр Гаумеї вказує на те, що її поверхня переважно вкрита льодом води, тоді як у спектрах Плутона, Ериди та Макемаке домінують смуги поглинання льоду метану. Серед усіх досліджених об'єктів

найглибші смуги поглинання метану характерні для поверхні Макемаке, що робить цю карликову планету цікавим об’єктом для подальших досліджень.

У *третьому підрозділі* наведено фізичні характеристики поверхонь інших популяцій віддалених малих тіл, а також описано їх загальноприйняту таксономічну класифікацію. Згідно з сучасною спектральною класифікацією астероїдів, переважна частина троянців Юпітера належить до спектральних класів D та P. Хоча вважається, що на поверхні троянців має існувати вода, слідів її присутності за даними спектральних спостережень знайдено не було. За показниками кольору поверхонь транснептунові об’єкти та кентаври не належать до жодного «астероїдного» класу. За значеннями показників кольору у видимому та ІЧ-діапазонах було виділено чотири таксономічні класи ТНО, що відповідають нейтральним (BB), дуже червоним (RR) та помірно-червоним поверхням (BR та IR) [16].

Розділ 2 “Апаратура, методика редукції та аналізу фотометричних та спектральних спостережень”. У *першому підрозділі* описано інструментальну базу, що використовувалася для отримання фотометричних спостережень, процедуру первинної редукції фотометричних даних, методи апертурної та ФРТ-фотометрії (ФРТ – функція розсіяння точки), та описано метод Фур’є-аналізу для пошуку періоду осьового обертання.

Для фотометричних спостережень у рамках міжнародної кооперації використовувалася низка телескопів з діаметрами дзеркала від 0.7 до 3.6 метрів, що розташовані на різних довготах. У таблиці 1 наведено основні характеристики телескопів та ПЗЗ-камер, за допомогою яких отримано спостережні дані.

Процес первинної редукції фотометричних даних включав стандартні процедури, а саме: корекцію за теплові шуми та врахування неоднорідності чутливості ПЗЗ-матриці.

При апертурній фотометрії за допомогою кругової діафрагми, розмір якої визначається значенням FWHM, виділялася центральна частина об'єкта на зображенні та проводився підрахунок загальної кількості відліків, що в неї потрапили. Метод ФРТ-фотометрії, в основі якого лежить припущення про незмінність форми профілю точкових джерел світла на ПЗЗ-зображенні, використовувався у тих випадках, коли об’єкт знаходився близько до зорі поля.

Для малих тіл Сонячної системи основними причинами періодичних варіацій блиску є несферичність їх форми та/або неоднорідність поверхневого шару (варіації альбедо поверхні). Для знаходження періоду осьового обертання використовувався метод Фур'є-аналізу кривих блиску, в якому крива блиску об'єкта представляється у вигляді ряду Фур'є m-того порядку:

$$H(\alpha,t) = \bar{H}(\alpha) + \sum_{L=1}^{m}\left[A_L \cos\frac{2\pi L}{P}(t-t_0) + B_L \sin\frac{2\pi L}{P}(t-t_0)\right],$$

де $H(\alpha,t)$ – зоряна величина на фазовому куті α на момент часу t, $\bar{H}(\alpha)$ – середнє значення блиску на фазовому куті α, A_L, B_L – коефіцієнти Фур’є, P – період обертання та t_0 – нульовий момент часу.

Для знаходження періоду обертання методом найменших квадратів вирішується рівняння:

$$s^2 = \frac{1}{n-k}\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{V_i\left(\alpha_j - H(\alpha_j t_j)\right)}{\varepsilon_i}\right]^2 \rightarrow min,$$

де V_i – i-те значення блиску, n – загальне число спостережень, $k = 2m + p + 1$ – кількість вільних параметрів, m – ступінь ряду Фур'є, p – кількість дат спостережень, α_j – фазовий кут j-ї ночі, ε_i – похибка спостереження.

Таблиця 1

Параметри апаратури, що використовувалася для фотометричних спостережень

Обсерваторія	D, м	ПЗЗ-камера	Кількість пікселів	Масштаб пікселя, "/пікс.	Поле зору, кут. хв
Обсерваторія Roque de los Muchachos (Іспанія)	3.6	E2V 4240	2048×2048	0.25	8.6×8.6
Кримська астрофізична обсерваторія (Україна)	2.6	FLI PL-4240	2048×2048	0.56	9.5×9.5
Обсерваторія Roque de los Muchachos (Іспанія)	2.5	x4 EEV	2000×4000	0.33	11×22
Українo-Російська обсерваторія Пік Терскол (Росія)	2.0	FLI PL-4301	2048×2048	0.31	10.7×10.7
Обсерваторія Sierra Nevada (Іспанія)	1.5	CCDT150	2000×2000	0.46	7.8×7.8
Обсерваторія Calar Alto (Іспанія)	1.2	DLR-III	4000×4000	0.31	21.5×21.5
Сімеїзька обсерваторія (Україна)	1.0	FLI PL09000	3072×3072	0.56	9.5×9.5
Тянь-Шаньська астрономічна обсерваторія (Казахстан)	1.0	Apogee Alta F9000	3056×3056	0.74	18.9×18.9
Абастуманська астрофізична обсерваторія (Грузія)	0.7	FLI IMG6303E	3072×2048	0.87	44.3×29.5
Чугуївська спостережна станція (Україна)	0.7	ML47-10	1056×1027	0.95	16.8×16.3

У *другому підрозділі* описано апаратуру, що використовувалася для отримання спектральних даних, методику їх редукції та особливості моделі, що використовувалася для побудови модельних спектрів.

Спектральні спостереження були отримані на 3.6-м телескопі TNG (Обсерваторія Roque de los Muchachos, Іспанія). У видимому діапазоні довжин хвиль використовувався спектрограф низької роздільної здатності DOLORES (Device Optimized for the LOw RESolution), в інфрачервоному діапазоні – інструмент NICS (Near Infrared Camera Spectrometer). Методика первинної редукції спектральних даних подібна до редукції фотометричних спостережень, але додатково включає в

себе виділення одновимірного спектру з двовимірного ПЗЗ-зображення, калібрування спектру за довжинами хвиль та ділення спектру на спектр зорі-стандарту.

Для отримання модельних спектрів використовувалася модель Шкуратова [29]. В цій моделі багатократне відбиття на окремій частинці розглядається як багатократне розсіювання в одновимірному середовищі. Описано обмеження використання даної моделі при інтерпретації результатів моделювання поверхонь віддалених малих тіл. Основні обмеження полягають у тому, що деякі параметри моделі можуть бути невідомими, відомими з малою точністю або бути взаємопов'язаними.

У **Розділі 3 "Спектрофотометрія карликової планети Макемаке"** розглядаються результати довгострокового моніторингу карликової планети Макемаке за даними фотометричних та спектральних спостережень. Фотометричні спостереження проводилися в сервісному режимі різними спостерігачами у період з 2006 по 2017 рр. Обробка усіх отриманих фотометричних спостережень була виконана дисертантом за єдиною методикою.

Більша частина даних була отримана у фільтрі R системи Джонсона–Козінса. Загалом було отримано 53 криві блиску. Пошук періоду обертання Макемаке проводився в діапазоні від 6 до 30 год з кроком 10^{-5} год. Отримана періодограма наведена на рис. 1.

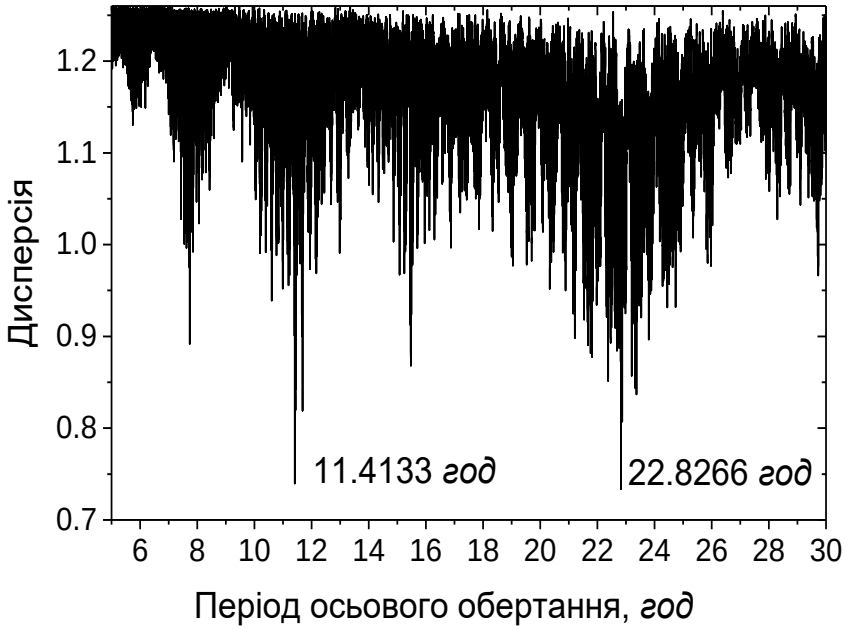

Рис. 1. Періодограма, що побудована з використанням даних спостережень. Піки на періодограмі відповідають періодам обертання в 11.4133 год та 22.8266 год.

Знайдені піки мінімальної дисперсії відповідають періодам обертання 11.4133 год (крива блиску з однією парою екстремумів) та 22.8266 год (крива блиску з двома парами екстремумів). Використання методу біннінг-аналізу підтвердило існування асиметрії кривої блиску (95% довірчий інтервал), що дало можливість надати перевагу періоду обертання з двома парами екстремумів P = 22.8266±0.0005 год. Асиметрія кривої блиску свідчить про відхилення форми Макемаке від ідеально сферичної та можливі альбедні варіації по поверхні. На рис. 2

(ліворуч) зображено складену криву блиску карликової планети з періодом P = 22.8266±0.0005 год за даними наших спостережень. Дані з роботи [19], що були отримані в 2007 році, також узгоджуються з довгим періодом осьового обертання (рис. 2, праворуч). Знайдено амплітуду кривої блиску A = 0.032±0.005 зор. вел.

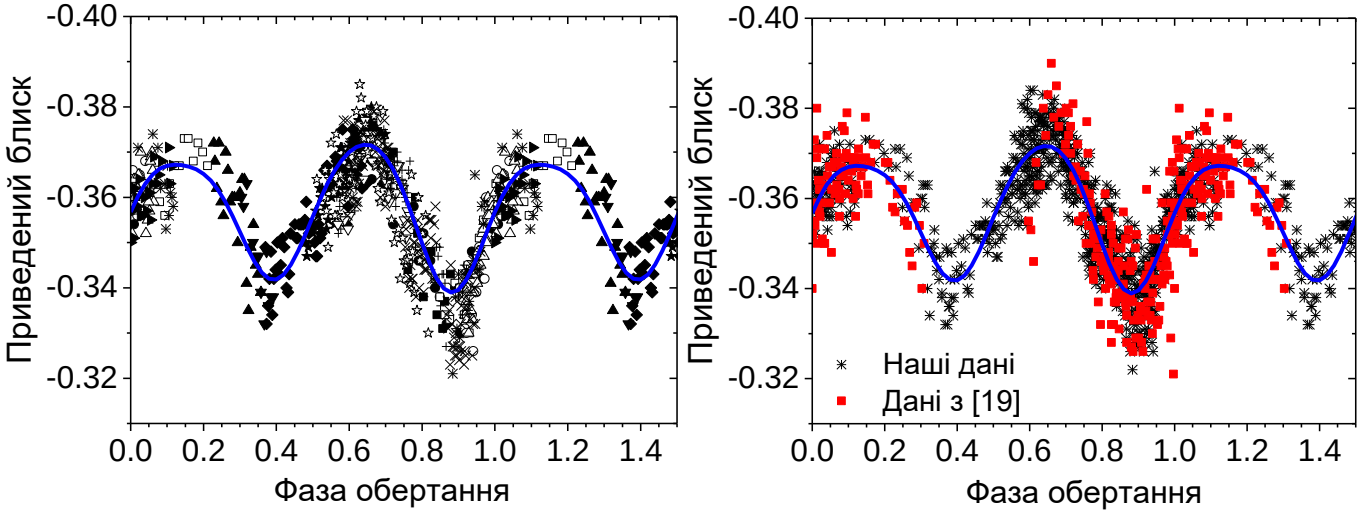

Рис. 2. Складені криві блиску Макемаке за нашими даними (ліворуч) та за нашими даними разом із даними з роботи [19] (праворуч). Суцільною лінією показано апроксимацію рядом Фур'є.

За даними фотометричних спостережень у різних спектральних смугах були отримані показники кольору B–V = 0.91±0.03 зор. вел., V–R = 0.41±0.02 зор. вел. та V–I = 0.65±0.03 зор. вел., які свідчать про помірно-червоний колір поверхні Макемаке.

Довгострокові фотометричні спостереження дали змогу отримати фазову залежність блиску у діапазоні фазових кутів 0.5–1.1°, що є максимальним на сьогодні діапазоном для наземних спостережень Макемаке. Лінійний коефіцієнт фазової залежності становить 0.027±0.011 зор. вел./°, а її хід є подібним до фазових залежностей блиску карликових планет Плутона та Ериди, поверхня яких також багата на метан [32].

Наявність фотометричних даних за більш ніж десять років спостережень дала змогу дослідити поведінку абсолютного блиску та амплітуди кривої блиску Макемаке впродовж цього часу. За даними, що були отримані в роботі та поєднані з даними літературних джерел [19, 20, 26], для Макемаке не спостерігаються варіації абсолютного блиску та амплітуди кривої блиску з моменту її відкриття у 2005 р. (рис. 3).

Спектральні спостереження Макемаке проводились у 2006, 2011 та 2013 роках у видимому та ближньому ІЧ-діапазонах від 0.5 мкм до 2.4 мкм. У 2011 році дані спостережень були отримані на різних фазах обертання з метою дослідити ступінь однорідності поверхні. На рис. 4 наведено деякі спектри, що були отримані в березні 2011 р. Для порівняння спектрів на різних фазах обертання були знайдені спектральні нахили на відрізку довжин хвиль 0.55–0.65 мкм. Величини нахилу знаходяться у

діапазоні 7–11%/100 нм та є подібними в межах похибок (±3%/100 нм), що свідчить про високий ступіть однорідності поверхні.

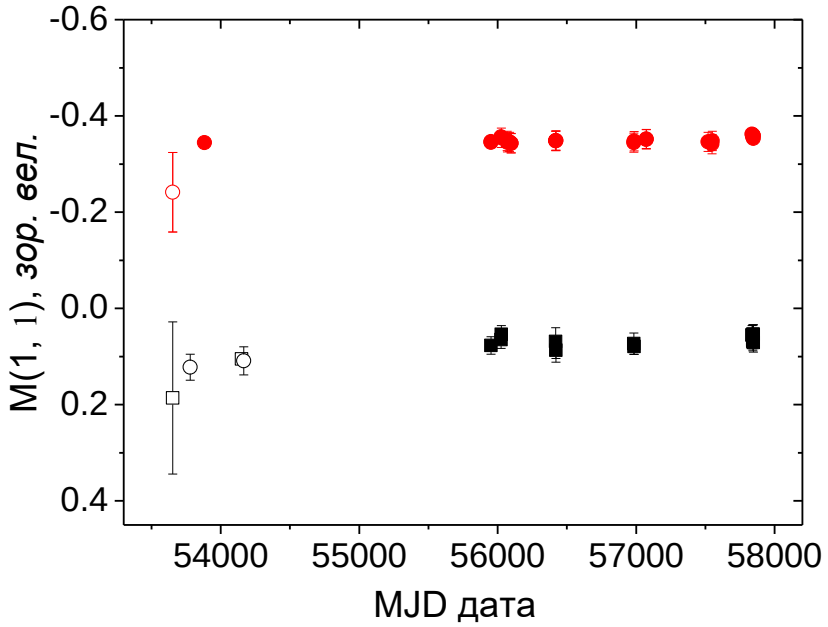

Рис. 3. Довгострокова залежність абсолютного блиску Макемаке від часу в фільтрах V та R. Дані вимірювань блиску іншими авторами [19, 20, 26] показано відкритими символами.

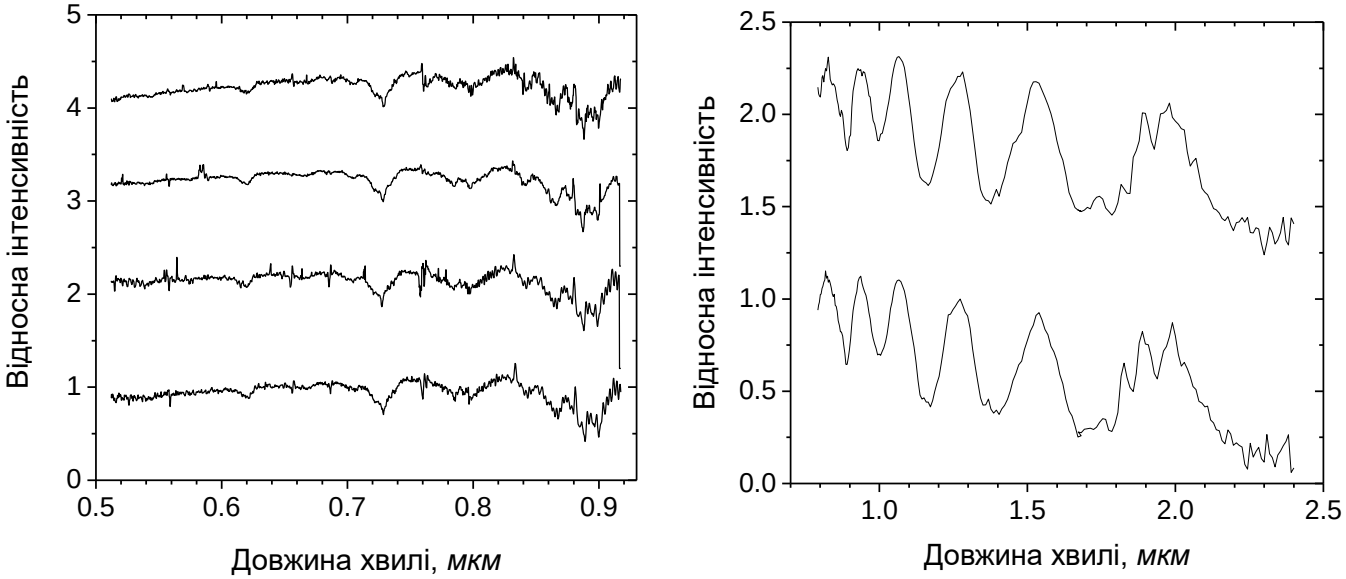

Рис. 4. Спектри відбиття Макемаке у видимому (ліворуч) та ближньому ІЧ-діапазонах (праворуч), що були отримані 28–29 березня 2011 р.

Для кожного отриманого спектру Макемаке було знайдено зсув найглибших смуг метану (на довжинах хвиль 729.6, 786.2, 799.3, 844.2 та 869.1 нм) по відношенню до відповідних смуг у спектрі чистого метанового льоду. Середнє значення зсуву (та його стандартне відхилення) становить –0.62±1.9 нм, що відповідає незначній кількості (долі відсотку) азоту на поверхні Макемаке. Не було знайдено суттєвих відмінностей у значеннях зсувів смуг спектрів, виміряних на різних фазах обертання, що також вказує на однорідність поверхні. Таким чином, отримані результати не

підтверджують гіпотезу [24] про існування локалізованих процесів сублімації та конденсації на поверхні Макемаке. У роботі [25] надається перевага екваторіальному аспекту спостережень Макемаке. Якщо це дійсно так, висновок про однорідність поверхні карликової планети буде більш достовірним. З іншого боку, при майже полярному аспекті спостереження навіть суттєві варіації поверхні можуть залишитись непоміченими.

Для оцінки можливого складу речовини поверхні Макемаке було проведено моделювання отриманого спектру у діапазоні довжин хвиль 0.6–2.4 мкм. Модельні спектри розраховувалися як для чистого льоду метану, так і для різних сумішей, що містили лід метану, лід етану, толіни, продукти іррадіації метану та водяний лід. Розмір частинок компонентів коливався у діапазоні від 10 мкм до 1 см з кроком 50 мкм та від 1 до 10 см з кроком 1 мм, а концентрація кожного компонента змінювалася з кроком 1%. На рис. 5 зображено спектр Макемаке, спектральна модель чистого метанового льоду та одна з найкращих моделей спектра, що була обрана шляхом мінімізації середньоквадратичного відхилення від спектру Макемаке.

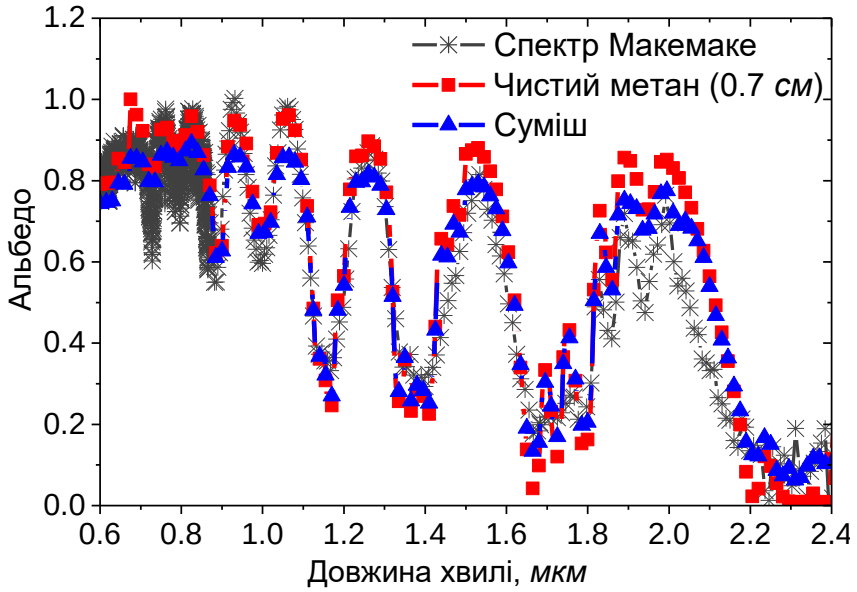

Рис. 5. Спектр Макемаке (лінія з зірочками) разом зі спектральними моделями чистого метану (лінія з квадратами) та найбільш вдалої суміші (лінія з трикутниками).

Додавання у модель льоду етану підвищило подібність реального та розрахованого спектрів, зокрема в області довжин хвиль 2.2–2.4 мкм, де знаходиться багато смуг поглинання етану та інших гідрокарбонатів. Крім того, модельний спектр покращило додавання в невеликій кількості толінів та ацетилену. Фінальна суміш складається на 60% з великих частинок метанового льоду (1.1 см), на 5% з дрібних часток метану (100 мкм), на 24% з етанового льоду (розмір частинок – 100 мкм), 10% етилену (розмір частинок – 50 мкм) та 1% льоду толінів (розмір частинок – 100 мкм).

Таким чином, кількість льоду метану на поверхні Макемаке може становити від 65%, що є більшим за оцінки наявності метану на інших тілах Сонячної системи.

Розділ 4 “Результати і аналіз спектрофотометричних спостережень малих тіл зовнішньої області Сонячної системи”. *Перший підрозділ* присвячено результатам спектральних спостережень двох найбільших троянців Юпітера – (624)

Гектор та (911) Агамемнон. Спектри троянців у видимому та ІЧ-діапазонах були отримані Д. Перна (Паризька обсерваторія) протягом двох ночей з 18 по 20 грудня 2013 р. на телескопі TNG. Знайдені спектральні нахили обох тіл є подібними: 10–12±2%/100 нм на відрізку 0.55–0.80 мкм, і 40–42±2%/100 нм на відрізку 0.90–1.65 мкм. Отримані нахили свідчать про однорідну червону поверхню, характерну для астероїдів D-типу. Оскільки не було знайдено варіативності спектральних даних, чотири спектри у видимому діапазоні та два спектри у ближньому ІЧ-діапазоні, що отримані для кожного об'єкта, були об'єднані для підвищення співвідношення сигнал-шум. Користуючись відомими значеннями геометричного альбедо для обох троянців (p_v = 0.057 ± 0.004 для троянця (624) Гектор [18] та p_v = 0.042 ± 0.005 для троянця (911) Агамемнон [28]), отримані спектри були відповідно нормовані на довжині хвилі 0.55 мкм. Для дослідження можливого складу поверхонь було виконано моделювання спектрів з використанням моделі Шкуратова. При моделюванні використовувалися різні суміші матеріалів, які можуть бути присутніми на поверхні троянців: темні вуглецеві сполуки, мінерали, органічні матеріали та водяний лід. У таблиці 2 наведено порівняльну характеристику фізичних властивостей обох троянців. Моделі спектрів для троянців (624) Гектор та (911) Агамемнон представлені на рис. 6 та рис. 7. Найкращі спектральні моделі обох об'єктів містять аморфний вуглець, піроксен та кероген.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика фізичних властивостей троянців (624) Гектор та (911) Агамемнон

	(624) Гектор	(911) Агамемнон
Діаметр, км	203 ± 4 [18]	166 ± 2 [28]
Альбедо	0.057 ± 0.004 [18]	0.042 ± 0.005 [28]
Спектральний тип	*D*	*D*
Період обертання, год	6.9205 ± 0.0005 [21]	6.5819 ± 0.0007 [23]
Середній нахил спектру	11.6 ± 2 %/100 нм (вид) 41.0 ± 2%/100 (ІЧ)	10.5 ± 2 %/100 нм (вид) 41.6 ± 2%/100 (ІЧ)
Склад поверхні за результатами моделювання	45% – аморфний карбон, 35% – піроксен, 20% – кероген	40% – аморфний карбон, 40% – піроксен, 20% –кероген

Другий підрозділ присвячено результатам фотометрії вибраних ТНО та кентаврів. Наведено результати фотометрії п'яти класичних ТНО (два з яких є представниками сімейства Гаумеа), трьох кентаврів, одного об'єкта розсіяного диска та одного об'єкта на високоексцентричній орбіті, що не було віднесено до жодного динамічного типу. Спостереження дев'яти тіл проводилися Д. Перна на 3.6-м телескопі TNG. Дані отримані в фільтрі R фотометричної системи Джонсона–Козінса. Спостереження об'єкта 2016 ND21 проводилися С. Величко (НДІ астрономії НХУ ім. В. Н. Каразіна) протягом 6 ночей у фільтрах BVR на 2.0-м телескопі обсерваторії Терскол. За

результатами спостережень зроблено оцінку амплітуд кривої блиску та періодів осьового обертання. Результати фотометрії наведено у таблиці 3.

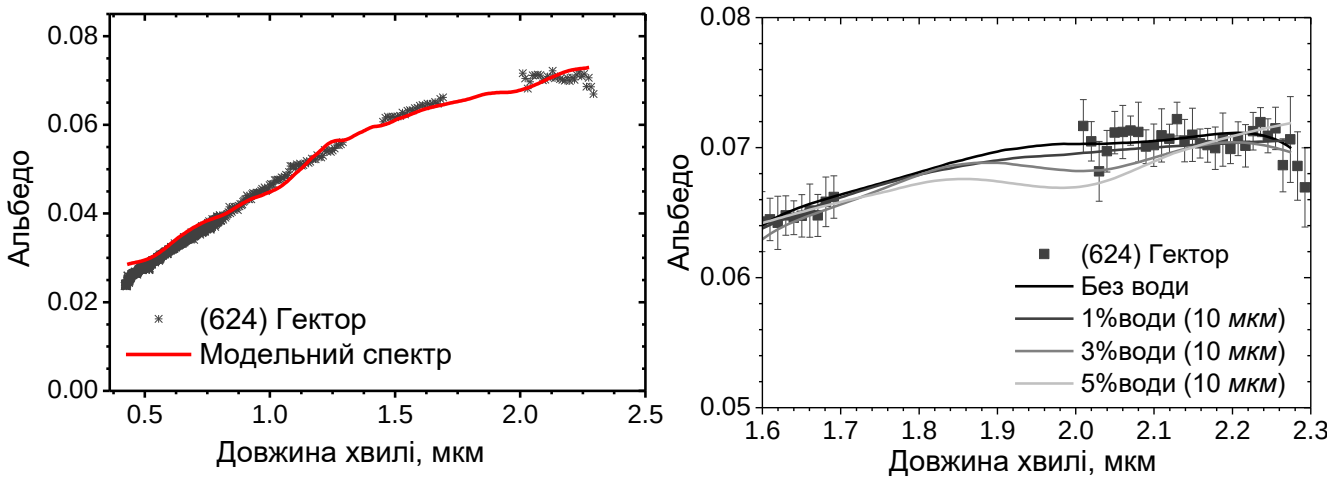

Рис. 6. Ліворуч: спектр відбиття у видимому та ближньому ІЧ-діапазонах троянця (624) Гектор у порівнянні з однією з найкращих спектральних моделей, яку наведено у таблиці 2. Праворуч: частина ІЧ-спектру троянця (624) Гектор та спектральні моделі з різною концентрацією водяного льоду.

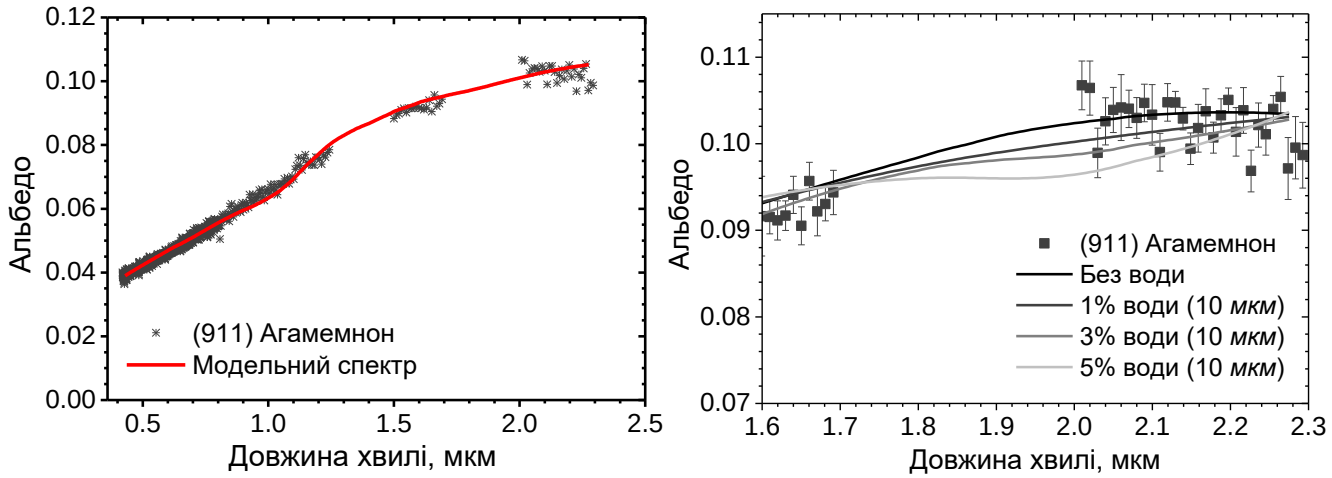

Рис. 7. Ліворуч: спектр відбиття у видимому та ближньому ІЧ-діапазонах троянця (911) Агамемнон у порівнянні з однією з найкращих спектральних моделей, яку наведено у таблиці 2. Праворуч: частина ІЧ-спектру троянця (911) Агамемнон та спектральні моделі з різною концентрацією водяного льоду.

Для п’яти об'єктів (148975) 2001 XA255, (281371) 2008 FC76, (315898) 2008 QD4, 2008 CT190 та 2016 ND21 оцінка значень періоду обертання була зроблена вперше. Для двох об'єктів: (55636) 2002 TX300 та (202421) 2005 UQ513 було підтверджено раніше опубліковані результати. Для трьох – (120178) 2003 OP32, (145452) 2005 RN43, (444030) 2004 NT33 – було покращено точність значення періоду обертання. Періоди обертання для об'єктів, що спостерігалися протягом більше однієї ночі, знаходилися з використанням наших даних у поєднанні з даними літературних джерел, якщо такі існували [17, 30, 31]. Більшість об'єктів має низьку амплітуду та симетричну криву блиску. Через це важко відрізнити криві блиску з одною чи двома парами екстремумів, тому у таблиці 3 наведено значення для обох варіантів.

Виключенням є об’єкти 2003 OP32 та 2016 ND21, для яких було знайдено асиметрію екстремумів кривої блиску, що свідчить про криву блиску з двома парами екстремумів. На рис. 8 зображено складені криві блиску для об’єктів 2003 OP32 та 2016 ND21. Для об’єкта 2016 ND21 були також отримані показники кольору B–V = 1.10 ± 0.08 зор. вел., V–R = 0.69 ± 0.04 зор. вел. та B–R = 1.79 ± 0.08 зор. вел., що вказують на дуже червону поверхню, подібну до тіл таксономічного класу RR.

Таблиця 3

Результати фотометрії вибраних ТНО та кентаврів

Об’єкт	H*, зор. вел.	D*, км	P_{single}, год	P_{double}, год	A, зор. вел.
(55636) 2002 TX300	3.3	286	8.04±0.04	16.08±0.04	0.05±0.01
(120178) 2003 OP32	4.1	~216	–	9.7057±0.0001	0.15±0.01; 0.18±0.01
(145452) 2005 RN43	3.9	679	6.946±0.05	13.892±0.05	0.04±0.01
(148975) 2001 XA255	11.1	38	> 7	> 14	~0.2
(202421) 2005 UQ513	3.4	498	7.03±0.005	14.06±0.005	0.07±0.01
(281371) 2008 FC76	9.3	~41–82	5.93±0.05	11.86±0.05	0.04±0.01
(315898) 2008 QD4	11.3	~16–35	> 7	> 14	~0.15
(444030) 2004 NT33	4.7	423	7.871±0.05	15.742±0.05	0.05±0.01
2008 CT190	5.5	~236–470	> 5	> 10	~0.15
2016 ND21	12.3	~10–21	–	17.53±0.02	0.31±0.01

***** За даними Міжнародного центру малих планет (Minor Planet Center).

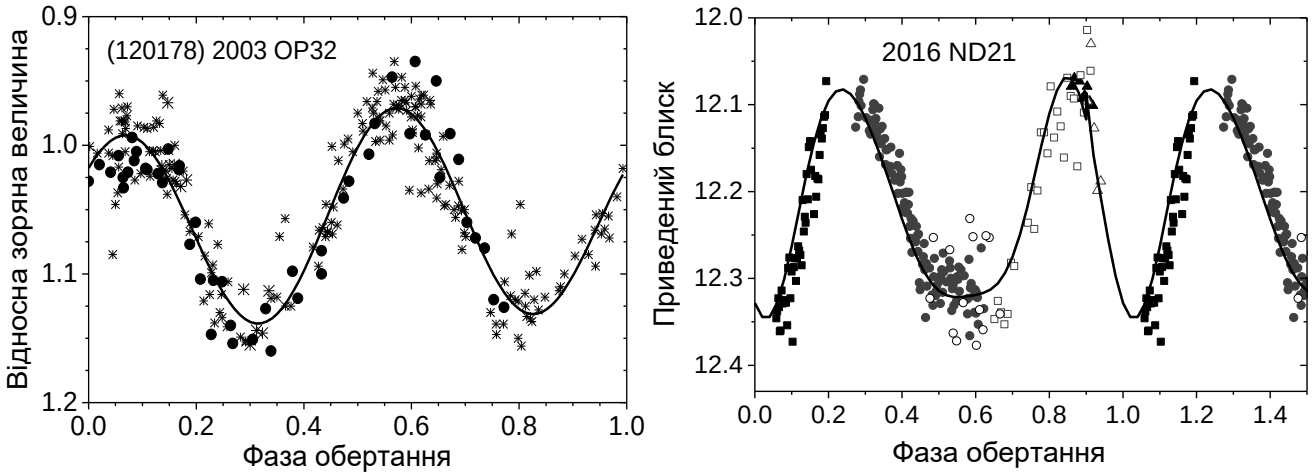

Рис. 8. Складені криві блиску для об’єктів (120178) 2003 OP32 (ліворуч) та 2016 ND21 (праворуч). Суцільною лінією показано апроксимацію рядом Фур’є.

Третій підрозділ присвячено отриманню «типових» спектрів для таксономічних класів ТНО та кентаврів. Для переважної більшості об'єктів спектри у видимому та ІЧ-діапазонах отримувалися на різних інструментах. Тому різні частини спектрів були поєднані за даними фотометричних спостережень. Для більше ніж третини об'єктів існує часова затримка при отриманні фотометричних даних та різних частин спектральних даних. У випадку видовженої форми фігури або за наявності неоднорідностей на поверхні, дані, що отримані на різних фазах обертання або при зміні умов спостереження (фазового кута, відстані до Землі тощо), можуть призвести до неточності при поєднанні всіх частин спектру.

Для отримання усереднених спектрів було використано дані для 43 об'єктів, які належать до різних таксономічних класів, а саме: 6 належать до класу BB, 17 – до класу BR, 9 – до класу IR та 11 – до класу RR. Перехід від зоряних величин до відносних потоків робився на середній довжині хвилі фотометричних смуг R, I, J, H та K, що знаходяться на 0.658, 0.806, 1.220, 1.630 та 2.190 мкм відповідно. У результаті було отримано чотири усереднених спектри для таксономічних класів транснептунових об'єктів BB, IR, BR та RR, що знаходяться в діапазоні довжин хвиль від 0.45 до 2.40 мкм. Середні спектри наведено на рис. 9.

Середні спектри класів BB та RR помітно відокремлені від решти спектрів. З іншого боку, для проміжних груп BR та IR не спостерігається подібного чіткого розділення. Найвірогідніше, це пов'язане з тим фактом, що більшість представників цієї групи не були остаточно класифіковані до тієї чи іншої групи. Усереднені спектри також підтверджують наявність тренду, який було знайдено у роботі [15] щодо присутності смуг поглинання води у кожній таксономічній групі. Також було показано, що середні спектри груп RR та IR мають смугу поглинання на 2.3 мкм, що може бути індикатором присутності гідрокарбонатів та/або метанолу на поверхнях цих тіл. Отримані середні спектри можуть бути використані для розрахунків середніх показників кольору кожної таксономічної групи в різних фотометричних системах.

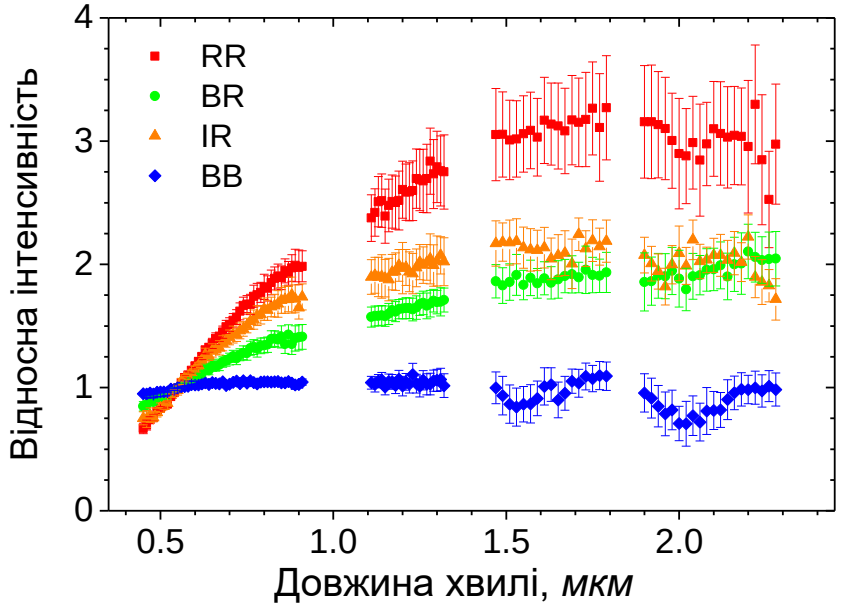

Рис. 9. Середні спектри для різних таксономічних класів ТНО та кентаврів.

Четвертий підрозділ присвячено порівняльному аналізу обертальних властивостей ТНО та кентаврів. Загалом для аналізу було зібрано дані для 162 об'єктів, з яких 136 – це представники ТНО, а 26 – кентаври. Для цих тіл на момент аналізу була відома як мінімум амплітуда кривої блиску. Більшість амплітуд кривих блиску ТНО та кентаврів знаходиться у діапазоні 0.1–0.2 зор. вел. Знайдений середній період обертання для ТНО та кентаврів відповідає значенню 8.0 ± 0.38 год (130 об’єктів), тільки при врахуванні ТНО – 8.05 ± 0.32 год (106 об’єктів), тільки для популяції кентаврів – 7.76 ± 0.55 год (24 об’єкти). Розподіли періодів обертання було побудовано окремо для різних динамічних популяцій ТНО: класичних, резонансних та об'єктів розсіяного диска, для яких спостерігається певна відмінність у величинах середньої швидкості обертання. Зокрема, резонансні ТНО мають тенденцію обертатися у середньому швидше за решту віддалених малих тіл (рис. 10). Середні періоди обертання є різними у кожного динамічного типу: 7.05 год для резонансних ТНО (44 об’єкта), 8.39 год для класичних ТНО (57 об’єктів) та 9.00 год для об'єктів розсіяного диска (35 об’єктів). Крім того, окремо було проаналізовано сімейство Гаумеа та порівняно з рештою популяції. Представники цього сімейства мають тенденцію обертатися швидше, ніж решта ТНО, що підтверджує результат, отриманий у роботі [32].

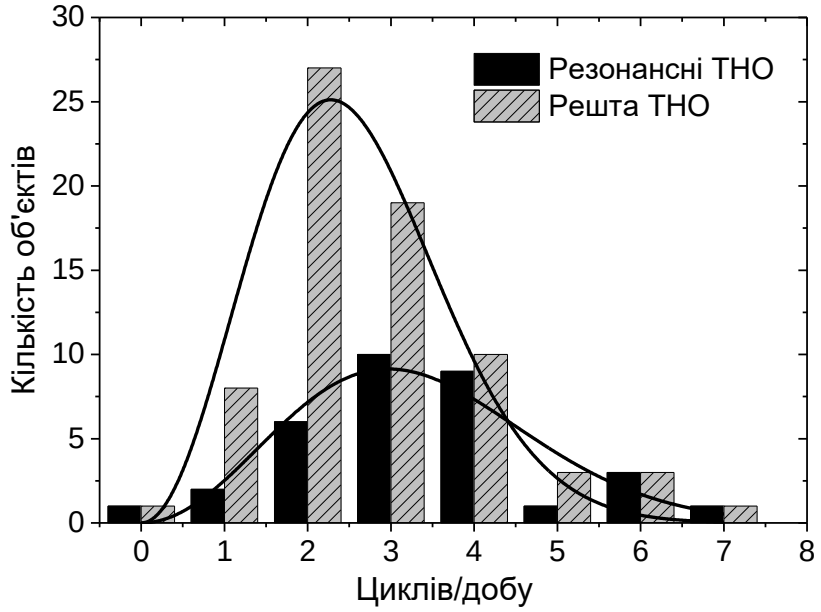

Рис. 10. Розподіл періодів обертання за кількістю об’єктів для резонансних тіл та решти ТНО. Суцільна лінія відповідає апроксимації розподілу функцією Максвелла.

За результатами порівняння обертальних та фізичних властивостей ТНО та кентаврів не було знайдено суттєвих кореляції між періодом обертання, амплітудою кривої блиску та кольором поверхні.

Оскільки спектри переважної більшості віддалених малих тіл не мають смуг поглинання, то при порівняльному аналізі бралися до уваги загальна форма спектру та ступінь спектрального нахилу у видимій та у ближній ІЧ-областях довжин хвиль. Для темних троянців, кентаврів та ТНО спектральний нахил знаходиться у діапазоні від нейтрального до дуже червоного. Також спостерігається помітна різниця між

спектрами тіл, що знаходяться у межах орбіти Юпітера, та спектрами ТНО і кентаврів. Астероїди D-типу, до яких належать троянці Юпітера з червоним спектральним нахилом, мають майже однакові показники нахилу як у видимому, так і в ІЧ-діапазоні. Червоні ТНО та кентаври, у свою чергу, мають дуже крутий спектральний нахил у видимому діапазоні та майже нейтральний нахил в ІЧ. Різні спектральні характеристики можуть свідчити як про відсутність зв'язку між цими популяціями, так і про відмінності у факторах впливу на їх поверхневий шар.

У **додатку А** наведено список публікацій автора за темою дисертаційної роботи у наукових фахових журналах та тезах конференцій, а також відомості про апробацію результатів дисертації.

У **додатку Б** приведено таблицю Б.1 з результатами фотометричних спостережень карликової планети Макемаке. У таблиці Б.2 наведено список ТНО та кентаврів, що входять до створеної бази даних спектральних спостережень. Для кожного об'єкта вказано проміжок часу між отриманням спектральних даних у видимому та ближньому ІЧ-діапазонах, проміжок часу між фотометричними та спектральними спостереженнями, зазначено динамічний тип, таксономічний клас та показники кольору за літературними даними. Таблиця Б.3 містить основну інформацію про фізичні та орбітальні властивості об'єктів, що були використані для порівняльного аналізу обертальних властивостей ТНО та кентаврів.

У **додатку В** наведено вихідний код комп'ютерної програми для моделювання спектрів відбиття безатмосферних тіл Сонячної системи.

ВИСНОВКИ

1. За результатами перших довгострокових фотометричних спостережень карликової планети Макемаке у 2006–2017 рр., було визначено з високою точністю період осьового обертання $P = 22.8266 \pm 0.0005$ год, що виявився значно довшим, ніж вважалося раніше, та визначено амплітуду кривої блиску $A = 0.037 \pm 0.002$ зор. вел. Отримано фазову залежність блиску у діапазоні фазових кутів 0.5–1.1°, що є максимальним на сьогодні діапазоном для наземних спостережень Макемаке. Лінійний коефіцієнт фазової залежності становить 0.027 ± 0.011 зор. вел./°. Показано, що у Макемаке відсутні варіації абсолютного блиску та амплітуди кривої блиску з моменту відкриття у 2005 р.

2. За результатами спектральних спостережень на різних фазах обертання, що були отримані у 2006, 2011 та 2013 роках у видимому та ближньому ІЧ-діапазонах поверхня Макемаке має високий ступінь однорідності. Присутність глибоких смуг поглинання метану у спектрі Макемаке свідчить про велику кількість метану на поверхні. Це підтверджується спектральним моделюванням, за результатами якого найбільш вірогідний склад поверхні Макемаке переважно складається з льодів метану (65%) та етану (24%), а також містить домішки інших продуктів опромінення метану. Середнє значення зсуву смуг поглинання метану у напрямку більш коротких довжин хвиль вказує на присутність на поверхні незначної кількості (долі відсотку) азоту. Відсутність суттєвих відмінностей між значеннями зсуву для різних спектрів не

підтверджує гіпотезу про існування локалізованих процесів сублімації та конденсації на поверхні Макемаке.

3. За результатами спектральних спостережень двох найбільших троянців Юпітера (624) Гектор та (911) Агамемнон на різних фазах обертання було показано, що обидва тіла мають досить однорідну червону поверхню, подібну до поверхонь астероїдів D-типу: спектральні нахили обох тіл є подібними: 10–12±2%/100 нм у видимому діапазоні і 40–42±2%/100 нм в ІЧ. Найкращими моделями спектру є моделі з поєднанням аморфного вуглецю, керогену та піроксену. Результати спектрального моделювання не вказують на присутність водяного льоду на поверхні обох троянців.

4. За результатами фотометрії 10 віддалених малих тіл було отримано оцінку періодів обертання та амплітуд кривих блиску. Серед них для п’яти об'єктів криві блиску було отримано вперше, а для одного об’єкта також вперше було отримано показники кольору.

5. Створено базу даних спектральних спостережень ТНО та кентаврів, у якій за даними фотометричних спостережень було поєднано спектри у видимому та ІЧ-діапазонах. За даними спектральних спостережень 43 ТНО та кентаврів побудовано усереднені спектри для різних таксономічних класів. Порівняльний аналіз обертальних властивостей вказує на існування певної відмінності у величинах середньої швидкості обертання у різних динамічних популяціях. Зокрема, резонансні ТНО мають тенденцію обертатися в середньому швидше за решту віддалених малих тіл.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації в наукових фахових журналах:

1. **Hromakina T. A.**, Starukhina L. V., Belskaya I. N., Korokhin V. V., 2015. Modeling of the spectral properties of the dwarf planet Makemake. Вісник Харківського національного університету ім. В. Н.Каразіна. Серія «Фізика», 1158 (22), 10–12.
2. Perna D., **Hromakina T.**, Merlin F., Ieva S., Fornasier S., Belskaya I., Mazzotta, Epifani E., 2017. The very homogeneous surface of the dwarf planet Makemake. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 466, 3594–3599.
3. Merlin F., **Hromakina T.**, Perna D., Hong M. J., Alvarez-Candal A., 2017. Taxonomy of trans-Neptunian objects and Centaurs as seen from spectroscopy. Astronomy & Astrophysics, 604, id. A86, 8 pp.
4. **Hromakina T.**, Perna D., Belskaya I., Dotto E., Rossi A., Bisi F., 2018. Photometric observations of nine Transneptunian objects and Centaurs. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 474, 2536–2543.
5. Perna D., Bott N., **Hromakina T.**, Mazzotta Epifani E., Dotto E., Doressoundiram A., 2018. Rotationally resolved spectroscopy of Jupiter Trojans (624) Hektor and (911) Agamemnon. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 475, 974–980.

6. **Hromakina T. A.**, Velichko S. F., Belskaya I. N., Krugly Yu. N., Sergeev A. V., 2018. Photometry of an unusual small distant object 2016 ND21. Astronomy & Astrophysics (CAUCASUS), 4, 39–46.

Публікації в матеріалах та тезах конференцій:

7. **Hromakina T.**, Belskaya I. N., Krugly Yu. N., Shevchenko V. G., Ortiz J. L., Santos-Sanz P., Duffard R., Moralez N., Thirouin A., Inasaridze R., Ayvazian V., Kvaratskhelia O., Perna D., Reva I., Serebryanskiy A., Rumyantsev V., Sergeyev A., Molotov I., Voropaev V., Velichko S. An extensive photometric study of the dwarf planet Makemake. European Planetary Science Congress. September 16-21 2018. Berlin, Germany. id.EPSC2018–692.
8. **Hromakina T.** Rotational properties of TNOs and Centaurs: current statistics and problems. International Conference "Atmosphereless Solar system bodies in the space exploration era". June 18–22, 2018. Kharkiv, Ukraine.
9. **Hromakina T.**, Perna D., Merlin F., Ieva S., Fornasier S., Belskaya I., Mazzotta Epifani E. Spectroscopy of the dwarf planet Makemake. European Planetary Science Congress. September 17–22, 2017. Riga, Latvia. id. EPSC2017–363.
10. **Hromakina T.**, Perna D., Belskaya I., Dotto E., Bisi F. Short-term rotational variability of selected Transneptunian objects and Centaurs. 17th Gamow Conference-School: "Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology", August 13–20, 2017. Odessa, Ukraine. P. 37.
11. **Hromakina T.** Problems in constraining surface composition of different atmosphereless Solar System bodies using radiative transfer models. 24th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. April 24–29, 2017. Kyiv, Ukraine. P. 45.
12. Doressoundiram A., Bott N., Perna D., **Hromakina T.**, Mazzotta Epifani E., Dotto E. Spectral modeling and imaging of Trojan asteroids (624) Hektor and (911) Agamemnon. Conference abstract "Asteroids, Comets, Meteors". April 10–14, 2017. Montevideo, Uruguay.
13. **Hromakina T.** Моделювання спектральних спостережень транснептунових об'єктів. X Барабашовські наукові читання з астрономії, 28 березня, 2015 р. Харків, Україна. с. 19–20.
14. **Hromakina T.**, Belskaya I. N., Ortiz, J. L., Shevchenko V. G. Rotation and shape of the dwarf planet Makemake. 21th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. April 28 – May 3, 2014. Kyiv, Ukraine. P. 12.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

15. Barucci M. A., Alvarez-Candal A., Merlin F. et al., 2011. New insights on ices in Centaur and Transneptunian populations, *Icarus*, 214, 297–307.
16. Barucci, M. A., Merlin F., Guilbert A. et al., 2008. Astrophysics Letter to the Editor Surface composition and temperature of the TNO Orcus, *Astrophysical Journal Letters*, 16, 16–19.

17. Benecchi, S. D. and Sheppard, S. S., 2013. Light curves of 32 large Transneptunian objects, *Astronomical Journal*, 145(5), 124–143.
18. Fernandez, Y., Sheppard, S. S. and Jewitt, D. C. 2003. The albedo distribution of the Jovian Trojan asteroids., *The Astronomical Journal*, 126, pp. 1563–1574.
19. Heinze, A. N. and DeLahunta, D., 2009. The Rotation Period and Light-Curve Amplitude of Kuiper Belt Dwarf Planet 136472 Makemake (2005 Fy9), *The Astronomical Journal*, 138(2), 428–438.
20. Jewitt, D., Peixinho, N. and Hsieh, H. H., 2007. U-Band Photometry of Kuiper Belt Objects, *The Astronomical Journal*, 134(5), 2046–2053.
21. Marchis, F. *et al.* 2014. The Puzzling Mutual Orbit of the Binary Trojan Asteroid (624) Hektor, *The Astrophysical Jornal Letters*, 783, L37.
22. Morbidelli A. *et al.*, 2005. Chaotic capture of Jupiter's Trojan asteroids in the early Solar System, *Nature*, 435(7041), 462–465.
23. Mottola, S. *et al.*, 2011. Rotational Properties of Jupiter Trojans. I. Light Curves of 80 Objects, *The Astonomical Jornal*, 141, 170.
24. Ortiz, J. L. *et al.*, 2012. Albedo and atmospheric constraints of dwarf planet Makemake from a stellar occultation', *Nature*, 491(7425), 566–569.
25. Parker, A. H. *et al.*, 2016. Discovery of a Makemakean moon. *The Astrophysical Journal*, 825, p. L9–L14.
26. Rabinowitz, D. L., Schaefer, B. E. and Tourtellotte, S. W., 2007. The Diverse Solar Phase Curves of Distant Icy Bodies. I. Photometric Observations of 18 Trans-Neptunian Objects, 7 Centaurs, and Nereid, *The Astronomical Journal*, 133, 26–43.
27. Schaller, E. L. and Brown, M. E., 2007. Volatile Loss and Retention on Kuiper Belt Objects., *The Astrophysical Jornal Letters*, 659, L61–L64.
28. Shevchenko V. G., Slyusarev I. G. and Belskaya I. N., 2014. Revised albedos of Trojan asteroids (911) Agamemnon and (4709) Ennomos, *Meteoritics and Planetary Science*, 49(1), 103–108.
29. Shkuratov, Yu. *et al.*, 1999. A model of spectral albedo of particulate surfaces: Implications for optical properties of the Moon, *Icarus*, 137(2), 235–246.
30. Thirouin, A. *et al.*, 2010. Short-term variability of a sample of 29 trans-Neptunian objects and Centaurs, *Astronomy & Astrophysics*, 522, A93.
31. Thirouin, A. *et al.*, 2012. Short-term variability of 10 trans-Neptunian objects, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 424(4), 3156–3177.
32. Thirouin, A. *et al.*, 2016. Rotational Properties of the Haumea Family Members and Candidates: Short-Term Variability, *The Astronomical Journal*, 151(6), 148.

АНОТАЦІЯ

Громакіна Т. А. Фотометрія та спектрофотометрія вибраних малих тіл зовнішньої області Сонячної системи. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи (104 – Фізика та астрономія). – Науково-дослідний інститут астрономії Харківського національного

університету імені В.Н. Каразіна, Харків; Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2019.

Робота присвячена вивченню фізичних властивостей вибраних малих тіл зовнішньої області Сонячної системи за результатами фотометричних та спектрофотометричних спостережень.

Довготривалий моніторинг карликової планети Макемаке показав, що період її осьового обертання є довшим, ніж вважалося раніше. Вперше показано відсутність варіацій абсолютного блиску та амплітуди кривої блиску карликової планети, вперше вказано на однорідність поверхні Макемаке та запропоновано найбільш вірогідний склад поверхні. Вперше досліджено ступінь однорідності поверхонь двох найбільших троянців Юпітера (624) Гектор та (911) Агамемнон. Зроблено оцінки періодів обертання та амплітуд кривих блиску для 10 транснептунових об'єктів (ТНО) та кентаврів, з них для п'яти об'єктів вимірювання кривих блиску було отримано вперше. Створено базу даних спектральних спостережень ТНО та кентаврів, в якій за даними фотометричних показників кольорів поєднані неодночасні спостереження у видимому та ближньому ІЧ-діапазонах спектру. Вперше отримано усереднені спектри для кожного таксономічного класу. Вперше показано, що періоди обертання резонансних ТНО в середньому менші, ніж періоди обертання класичних ТНО та об'єктів розсіяного диска.

Ключові слова: транснептунові об'єкти, кентаври, троянці Юпітера, ПЗЗ-фотометрія, період обертання, крива блиску, спектрофотометрія, моделювання спектру.

ANNOTATION

Hromakina T. A. Photometry and spectrophotometry of selected small bodies from the outer part of the Solar System. – Qualifying scientific work, the manuscript.

Thesis for a Candidate of Science degree in Physics and Mathematics by the specialty 01.03.03 – Heliophysics and physics of the Solar System (104 – Physics and astronomy). – Institute of Astronomy of V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv; Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2019.

The thesis focuses on the physical properties of the selected small bodies from the outer part of the Solar System by the means of photometric and spectrophotometric observations.

An extensive photometric study of the dwarf planet (136472) Makemake in 2006–2017 allowed to determine that the rotational period of the dwarf planet is $P = 22.8266 \pm 0.0005$ hr, which is much longer that it was previously suggested. The determined lightcurve amplitude of Makemake is $A = 0.037 \pm 0.002$ mag implies an almost spherical shape or near pole-on orientation. The phase-angle dependence of Makemake's magnitude was measured in the phase angle range of 0.5–1.1°, which is the largest angle range that is currently available for ground-based observations. We found a linear slope to be 0.027 ± 0.011 mag/° in R filter, which is similar to those of other methane-rich dwarf planets, namely, Eris and Pluto. Combining our and literature photometric data it was shown that the absolute magnitude of Makemake has remained unchanged since its discovery in 2005.

From rotationally-resolved spectroscopic observations in visible and near-infrared region it was shown that Makemake has a very homogeneous surface. A predominately

methane ice-rich surface of Makemake is suggested by the presence of deep methane absorption bands in its spectra. The outcome of spectral modelling is also supporting this result: the most probable surface composition contains 65% of methane ice, 24% of ethane ice, 10% of ethylene ice and 1% of tholin ice. The methane ice absorption bands in Makemake's spectra are shifted by ~0.6 nm towards shorter wavelengths, which suggests the presence of a small amount of nitrogen ice on the surface of the dwarf planet.

Rotationally-resolved spectroscopic observations of the two largest Jupiter Trojans (624) Hektor and (911) Agamemnon suggest that both objects have red surfaces similar to D-type asteroids with the high level of homogeneity. Spectral slope of both Trojans are in the range of 40–42±2%/100 nm in the visible and 10–12±2%/100 nm in the near-infrared region. The best spectral models of (624) Hektor and (911) Agamemnon are the combination of amorphous carbon, kerogen and pyroxene. The possible presence of water ice on the surface of both objects cannot exceed 3–5%.

For ten distant small objects, namely five classical Transneptunian objects (TNOs), four Centaurs and one scattered-disc object, the estimations of rotational periods and lightcurve amplitudes were made. For five objects – (148975) 2001 XA255, (281371) 2008 FC76, (315898) 2008 QD4, 2008 CT190, and 2016 ND21 – the lightcurves were acquired for the first time. For 2016 ND21, a distant object on an unusual orbit, surface colors were also determined, which allowed to classify it as a RR-type in the TNOs' taxonomical system. This could be the first evidence of an outer-belt origin of this object.

The database of spectral observations for TNOs and Centaurs was created. The database contains nonsimultaneous observations in the visible and near IR spectral range, which were linked together using photometric colour measurements. Using 43 spectra from the database four complete spectra corresponding to the different taxonomical classes from 0.45 to 2.40 microns were obtained. The results based on spectroscopy are in good agreements with those obtained using photometric data. The mean spectra could be used to edit colors in different photometric systems.

It was shown that the rotational period of resonant TNOs are on average smaller, than those of the classical TNOs and Scattered-disc objects. Moreover, it was confirmed that the members of Haumea family have a tendency to rotate slightly faster than the rest of TNOs.

The practical value of the thesis is determined by the large amount of original photometric and spectral observations that can be used in the future to study physical properties of distant Solar System objects, and also for the comparative analysis with other small bodies in our Solar System.

Acquired lightcurves of TNOs and Centaurs can be used for determining the shape of these bodies and the orientation of their spin axis. Obtained physical properties and the constrains of surface compositions can be used for space missions planning.

Key words: trans-Neptunian objects, Centaurs, Jupiter Trojans, CCD photometry, rotation period, lightcurve, spectrophotometry, spectral modelling.

АННОТАЦИЯ

Громакина Т. А. Фотометрия и спектрофотометрия избранных малых тел внешней области Солнечной системы. – 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 (104 – Физика и астрономия). – Научно-исследовательский институт астрономии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, Харьков; Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2019.

Работа посвящена изучению физических свойств избранных малых тел внешней области Солнечной системы по результатам фотометрических и спектрофотометрических наблюдений.

Длительный мониторинг карликовой планеты Макемаке показал, что период её осевого вращения длиннее, чем считалось ранее. Впервые показано отсутствие вариаций абсолютного блеска и амплитуды кривой блеска Макемаке, отмечена однородность её поверхности и предложен наиболее вероятный состав поверхности. Впервые исследована степень однородности поверхностей двух крупнейших троянцев Юпитера (624) Гектор и (911) Агамемнон. Сделаны оценки периодов вращения и амплитуд кривых блеска для 10 транснептуновых объектов (ТНО) и кентавров, из них для пяти объектов измерения кривых блеска были получены впервые. Создана база данных спектральных наблюдений ТНО и кентавров, в которой по данным фотометрических наблюдений объединены неодновременные наблюдения в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра. Впервые получены усредненные спектры для каждого таксономического класса. Впервые показано, что периоды вращения резонансных транснептуновых объектов в среднем меньше, чем периоды вращения классических ТНО и объектов рассеянного диска.

Ключевые слова: транснептуновые объекты, кентавры, троянцы Юпитера, ПЗС-фотометрия, период вращения, кривая блеска, спектрофотометрия, моделирование спектра.