

**ASTRONOMIYA INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR  
BERUVCHI PhD.02/20.12.2019.FM.15.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**ASTRONOMIYA INSTITUTI**

**ERGASHEV KAMOLIDDIN ESHTURSUNOVICH**

**QUYOSH TIZIMI KICHIK JISMLARINING ORBITAL VA FIZIK  
PARAMETRLARINI TADQIQ ETISH**

**01.03.01 – Astronomiya**

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Toshkent - 2024**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori  
(PhD) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**

**Content of the dissertation abstract of the doctor of philosophy (PhD) on  
physical and mathematical sciences**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD) по  
физико-математических наукам УДК 523.2, 523.4**

**Ergashev Kamoliddin Eshtursunovich**

Quyosh tizimi kichik jismlarining orbital va fizik parametrlarini tadqiq  
etish..... 3

**Эргашев Камолиддин Эштурсунович**

Исследование орбитальных и физических параметров малых тел  
Солнечной системы..... 21

**Ergashev Kamoliddin Eshtursunovich**

Study of orbital and physical parameters of the Solar system small  
bodies..... 40

**E'lon qilingan ishlar ro'yxati**

Список опубликованных работ  
List of published works..... 45

**ASTRONOMIYA INSTITUTI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR  
BERUVCHI PhD.02/20.12.2019.FM.15.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**ASTRONOMIYA INSTITUTI**

**ERGASHEV KAMOLIDDIN ESHTURSUNOVICH**

**QUYOSH TIZIMI KICHIK JISMLARINING ORBITAL VA FIZIK  
PARAMETRLARINI TADQIQ ETISH**

**01.03.01 – Astronomiya**

**FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Toshkent - 2024**

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.2.PhD/FMxxx raqami bilan ro'yxatga olingan.**

Dissertatsiya O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Astronomiya institutida bajarilgan.  
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasi ([www.astrin.uz](http://www.astrin.uz)) va "Ziyonet" axborot-ta'lim portalida ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:** **Egamberdiyev Shuhrat Abdumannapovich,**  
Fizika-matematika fanlari doktori, Akademik

**Rasmiy opponentlar:** **Yo'ldoshev Qudratillo Xabibullayevich,**  
Falsafa doktori (PhD), O'zR FA AI

**Axunov Tal'at Axmatovich,**  
Fizika-matematika fanlari doktori, O'zMU

**Yetakchi tashkilot:** **Fesenkov nomidagi Astrofizika Instituti,**  
**Qozog'iston**

Dissertatsiya himoyasi Astronomiya instituti huzuridagi PhD.02/20.12.2019.FM.15.01 raqamli Ilmiy kengashning 2023-yil \_\_\_\_\_ soat \_\_\_\_\_ dagi majlisidabo'libo'tadi. (Manzil: 100052, Toshkent shahri, Astronomiya ko'chasi, Astronomiya instituti. Tel. (+99871) 235-81-02; faks (+99871) 234-48-67; e-mail: info@astrin.uz).

Dissertatsiya bilan Astronomiya institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (\_\_\_ raqami bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100052, Toshkent shahri, Astronomiya ko'chasi, 33-uy, O'zR FA AI. Tel. (+99871) 235-81-02).

Dissertatsiya avtoreferati 2024-yil "\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ kuni tarqatildi.  
(2024-yil "\_\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ dagi \_\_\_\_\_ – raqamli reestr bayonnomasi)

**D.Sh. Fazilova**  
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy  
kengash raisi o'rinbosari, f.-m.f.d., professor

**I.A. Ibragimov**  
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy  
kengash ilmiy kotibi f.-m.f.n., katta ilmiy xodim

**A.B. Abdikamalov**  
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy  
kengash huzuridagi ilmiy seminar raisi  
f.-m.f.d., yetakchi ilmiy xodim

## **KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)**

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Jahonda Quyosh tizimi kichik jismlarini izlash va o'rganishga qaratilgan tadqiqotlar natijasi sifatida, bugungi kunga qadar Quyosh tizimida 1.3 milliondan ortiq ob'yektlar aniqlangan. Xalqaro Astronomiya ittifoqi (XAI) ning 2006-yildagi klassifikatsiyasiga ko'ra, Quyosh tizimi kichik jismlari tarkibiga transneptun ob'yektlar, kometalar va asteroidlar kiradi. Aniqlangan va kataloglashtirilgan kichik jismlarning deyarli 99 foizini asteroidlar tashkil qiladi. Asteroidlar Quyosh tizimi shakllanishining ilk davrlariga tegishli protoplanetar tumanlik qoldiqlari hisoblanadi va ular o'tgan vaqt davomida deyarli o'zgarmagan. Bu esa asteroidlar populyatsiyasi va dinamikasini o'rganish orqali Quyosh tizimining o'tmishi va shakllanish jarayonini yaxshiroq tushunish imkoniyatini beradi. Bu borada XAIning 2020-2030 yillarga mo'ljallangan strategik rejasida<sup>1</sup> "...Quyosh tizimining shakllanishi va evolyutsiyasini chuqurroq o'rganishni rivojlantirish va ushbu ob'ektlarning statistik tahlillarini o'tkazish" vazifalari belgilangan. Mazkur vazifalarning yechimida, Quyosh tizimi kichik jismlarining o'z o'qi atrofida aylanish davri va orbital aylanish davrlarini o'lchash, bu aylanish davrlarining gravitatsion va nogravitatsion kuchlar ta'sirida vaqt bo'yicha o'zgarishlarini aniqlash, asteroidlar populyatsiyasi va dinamikasini monitoring qilish muhim ahamiyat kasb etadi.

Jahonda mazkur yo'nalishdagi tadqiqotlarga, jumladan, asteroidlarga kosmik missiyalar yuborishdan tashqari, Yerdagi kuzatuv nuqtalariga asoslangan keng ko'lamli optik kuzatuvlarni tashkillashtirishga katta ahamiyat berilmoqda. Shu nuqtai nazardan, Quyosh tizimi kichik jismlarning orbital va fizik parametrlarini aniqlash, tez aylanuvchi nosferik asteroidllarga nogravitatsion kuchlar ta'sirini baholash, ularning spini, shakl modeli va boshqa fizik parametrlarini o'rganish ustuvor ahamiyat kasb etadi. Bundan tashqari, yakka, qo'shaloq asteroid tizimlari va aylanish-parchalanish orqali hosil bo'lgan o'zaro genetik bog'liq asteroid juftliklarining populyatsiyasi va dinamikasini o'rganishga qaratilgan tadqiqotlar dolzarb ahamiyatga ega.

Respublikamizda hozirda Quyosh tizimi kichik jismlarini kuzatish, ularning orbital va fizik parametrlarini tadqiq qilish va shu orqali ularning evolyutsiyasi, dinamikasi va populyatsiyasini o'rganishga qaratilgan qator ishlar amalga oshirilmoqda va ma'lum ijobiy natijalarga erishildi. 2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasida<sup>2</sup> "...Ekologiya va atrof muhitni muhofaza qilish" va "...Favqulodda vaziyatlarning oldini olish va bartaraf etishning samarali tizimini yaratish" yuzasidan muhim vazifalar belgilab berilgan. Bu borada sayyoramiz orbitasiga juda yaqin orbitalarda harakatlanuvchi va sayyoramizdagi biologik hayotga xavf soluvchi Potensial Xavfli Asteroidlar (PXA) ni monitoring qilishga qaratilgan tadqiqotlar muhim ahamiyat kasb etadi. Ushbu dissertatsiya ishi insoniyat sayyoraviy mudofaa maqsadlarida ilk marta

---

<sup>1</sup> IAU Strategic Plan 2020–2030. [https://www.iau.org/static/administration/about/strategic\\_plan/strategicplan-2020-2030.pdf](https://www.iau.org/static/administration/about/strategic_plan/strategicplan-2020-2030.pdf)

<sup>2</sup> O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi "2022-2026 yillarda Yangi O'zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to'g'risida"gi PF-60-son farmoni

zarba berish usulini sinab ko‘rgan DART (Double Asteroid Redirection Test) missiyasi doirasida Maydanak observatoriyasida hamkorlikda olib borilgan kuzatuvlarni ham qamrab olgan. Tadqiqot ishi Yaponiyaning Chiba texnologiyalar instituti va Chexiya fanlar akademiyasining Astronomiya instituti bilan hamkorlikda olib borilgan izlanishlar natijalarini o‘z ichiga olgan.

Mazkur dissertatsiya ishi O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi “2022-2026 yillarda Yangi O‘zbekistonni rivojlantirish strategiyasi to‘g‘risida”gi PF-60-son farmoni, shuningdek, O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021-yil 19-martdagi PP-5032-sonli “Fizika sohasida ta’lim sifatini oshirish va ilmiy-tadqiqotlarni rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”, hamda ushbu sohada qabul qilingan boshqa me’yoriy-huquqiy hujjatlarda berilgan vazifalarni amalga oshirishda muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi.** Mazkur tadqiqot ishi O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining: “Ilm-fanni 2030-yilgacha rivojlantirish konsepsiyasini tasdiqlash to‘g‘risida” gi 29.10.2020 yilda chiqarilgan PF-6097-sonli farmonining 3-bob “Ilm-fanni rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlari” da keltirilgan bandlari - “uchinchisi, yuqori malakali ilmiy va muhandis kadrlar tayyorlash hamda ularni ilmiy faoliyatga yo‘naltirish” va “beshinchisi, ilm-fan taraqqiyotiga ko‘maklashadigan zamonaviy axborot muhitini shakllantirish” ustuvor yo‘nalishlari doirasida bajarilgan.

**Muammoning o‘rganilganlik darajasi.** Hozirgi vaqtda Quyosh tizimi kichik jismlarini tadqiq etish, jumladan, ularning orbital va boshqa fizik parametrlarini aniqlash, sinflashtirish, ularga Yarkovskiy va YORP (Yarkovsky–O’Keefe–Radzievskii–Paddack) kabi effektlarning ta’sirini baholash va boshqa turli nazariy va amaliy tadqiqotlar chet ellik olimlardan P. Pravec, R.P. Binzel, E. Bowell, A.W. Harris, S.J. Ostro, D.J. Scheeres, D. Nesvorny, D. Vokrouhlicky, N.A. Moskovitz, Yu. N. Krugly, V. G. Shevchenko, D. Polishook, K. Muinonen, MDH (Mustaqil Davlatlar Hamdo‘stligi) mamlakatlaridan Yu.D. Medvedov, I.E. Molotov, Yu.A. Chernetenko, V.B. Kuznetsov, A. Serebryanskiy, L.I. Shestakova va boshqa bir qator olimlarning ilmiy ishlarida qisman o‘z aksini topgan. Respublikamizda hozirda Quyosh tizimi kichik jismlarini kuzatish, ularning orbital va fizik parametrlarini tadqiq qilish va shu orqali ularning evolyutsiyasi, dinamikasi va populyatsiyasini o‘rganishga qaratilgan qator ishlar amalga oshirilmoqda va ma’lum ijobiy natijalarga erishildi. Shuni ta’kidlash kerakki, ushbu tadqiqot ishi bizning mamlakatimizda asteroidlarni o‘rganish sohasi bo‘yicha birinchi dissertatsiya ishi hisoblanadi.

Bugungi kunda Quyosh tizimi kichik jismlari – asteroidlar haqidagi zamonaviy bilimlarning katta qismi Yerdan kuzatishga asoslangan optik va radar kuzatuvlaridan olingan. Shuningdek, Quyosh tizimi kichik jismlariga kosmik missiyalar jo‘natish ham juda qimmatli ma’lumotlarni bersada, bu imkoniyatdan foydalanishning cheklanganligi optik kuzatuvlarning ahamiyatini yanada orttiradi. Optik kuzatuv usullari nisbatan arzon va kuzatuv nuqtalarining keng tarmog‘i orqali osmon sferasining katta maydonlarini qamrab olish mumkin. Shuningdek, samarali kompyuter algoritmlari asteroidlarning katta hajmli kuzatuvlari

ma'lumotlarni tahlil qilishi mumkin (Jedicke va boshq., 2002; Larson, 2007; McMillan, 2007; Pravdo va boshq., 1999; Stokes va boshq., 2000; Kubica va boshq., 2007; Kaiser, 2004).

Asteroidlar protoplanetar tumanlik paydo bo'lishining qoldiqlari sifatida bizning Quyosh tizimimiz tarixini va uning qanday rivojlanganligini ko'rsatib beradi (Morbidelli va boshq., 2002, 2005). Gravitatsion va nogravitatsion effektlar ta'sirini o'rganish asteroidlar dinamikasi haqidagi bilimlarimizda sezilarli yutuqlarga olib keldi (Rosemary 2013). Bu Bosh-belbog' asteroidlarining Yer orbitasiga yaqin orbitalarga qanday keltirilishini yoritib beradi (Bottke va boshq., 2002b) va ma'lum kichik jismlardan iborat oilalarining tuzilishiga oydinlik kiritadi (Bottke va boshq., 2006). Yarkovskiy effekti Yerga Yaqinlashuvchi Asteroidlar (YYA) orbitalariga sezilarli ta'sir ko'rsatadi va eng aniq traektoriya prognozlarini, shu jumladan potentsial xavfli asteroidlarni bashorat qilish uchun uning ta'sirini hisobga olish kerak (Giorgini va boshq., 2002; Chesli, 2006; Giorgini va boshq., 2008; Milani va boshq., 2009). Hozirda Asteroidlar ichida Yerga yaqinlashuvchilarining to'qnashuv xavfi (Harris, 2008) ular ustidagi keng ko'lamli tadqiqotlarga sabab bo'lib, ayrim dalillar ularning ba'zi meteoritlarning manbai bo'lishi mumkinligini ko'rsatadi (Burbine va boshq., 2002). Ularning Yerdagi biologik evolyutsiya jarayoniga ta'sir eta olishi (Alvarez va boshq., 1980; Hildebrand va boshq., 1991) bu asteroidlarning ayrim kosmik missiyalarning tadqiqot ob'yektiga aylanishiga (Farquhar va boshq., 2002) va sayyoramizni himoya qilish uchun ularga kinetik ta'sir qilish (Tomas va boshq. 2023) usullaridan foydalanishga olib keladi. Kinetik ta'sir bilan bog'liq sinovlar hali insoniyat va fan uchun yangilik, bunday ta'sir oqibatlari qanday bo'lishi yaxshi o'rganilmaganligi bu boradagi modellarni qat'iy tahlil qilib chiqishni taqozo etadi.

Hozirda Quyosh tizimi kichik jismlari D.J. Scheeres (2007) tomonidan taklif qilinganidek aylanish-parchalanish orqali o'zaro bog'langan orbitalarda harakatlanuvchi qo'shloq (ikkilik) asteroidlar va juda o'xshash, ammo alohida orbitalarda harakatlanuvchi o'zaro genetik bog'liq asteroid juftliklarini hosil qiladilar deb hisoblaniladi.

Aniqlangan ilk asteroid juftliklari Vokrouhlicky va Nesvorny (2008) tomonidan kashf qilingan bo'lib, hozirda ular Pravec va Vokrouhlicky (2009), D. Nesvorny (2010) hamda Rozek va boshqalar (2011) tomonidan ishlab chiqilgan usullar orqali aniqlanadi. Pravec va boshqalar (2010) 32 ta asteroid juftlik namunasini o'rganib chiqib asteroid juftligi birlamchising aylanish chastotalari va asteroid juftlari massa nisbati o'rtasidagi bog'liqlikni topgan. Asteroid juftlarining batafsil kuzatuvlari Moskovitz (2012), Duddy va boshqalar (2012, 2013), Wolters va boshqalar (2014) va Polishook va boshqalar (2014a) tomonidan amalga oshirilgan. Aniqlangan asteroid juftliklari soni hali haqiqiy manzarani aks ettirmaydi. Ular orasida aylanish-parchalanish jarayoni orqali to'liq tushuntirib bo'lmaydigan ob'yektlar borligi bu boradagi tadqiqotlarni davom ettirish va iloji boricha ko'proq statistik ma'lumotlar to'plamini yig'ishni taqozo etadi.

**Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan ilmiy-tadqiqot muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi.** Dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Astronomiya institutining

“Galaktika astronomiyasi” laboratoriyasi ilmiy-tadqiqot rejalariga muvofiq, hamda quyidagi:  $\Phi A-\Phi A-\Phi 026$  “Quyosh tizimidagi kichik sayyoralarni qidirish va kuzatish, ularni orbital va fizik xossalarini tadqiq etish” (2012–2016),  $BA-\Phi A-\Phi-2-010$  “Sayyoralar tizimi jismlarining fazoviy va kinematik xususiyatlarini optik kuzatuvlar asosida tadqiq etish” (2017–2020) ilmiy loyihalar tadqiqotlari doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi.** Quyosh tizimi kichik jismlari (asteroidlar) ning orbital va fizik parametrlarini Maydanak va hamkor observatoriyalar ma’lumotlari, shuningdek, boshqa ochiq manba’lar asosida tadqiq etish.

**Tadqiqotning vazifalari:**

Quyosh tizimi kichik jismlarining Maydanak observatoriyasi kuzatuv ma’lumotlari bankini yaratish;

Olingan ravshanlik egri chiziqlari tarkibidagi davriy tashkil etuvchilarni aniqlash;

Davriy tashkil etuvchilardan ob’yektlarning qo’shaloqlik (ikkilik) belgilarini qidirish;

Aniqlangan yoki avvaldan ma’lum qo’shaloqlarning orbital va fizik parametrlarini aniqlash;

Asteroidlar genetik juftliklarini o’rganish va ularga tegishli fizik-orbital parametrlarni aniqlash;

**Tadqiqot obyekti** Quyosh tizimi asteroidlar Bosh-belbog’i ob’yektlari hamda Yerga yaqinlashuvchi asteroidlar.

**Tadqiqot predmeti** Quyosh tizimi kichik jismlarining ravshanlik egri chiziqlarida namoyon bo’ladigan davriy tashkil etuvchilar va ularning vaqt bo’yicha o’zgarishi orqali kechadigan fizik jarayonlarni o’rganish hisoblanadi.

**Tadqiqot usullari.** Quyosh tizimi kichik jismlarini kuzatish usullari, raqamli tasvirlarga ishlov berishning umume’tirof etilgan usullari, raqamli tasvirlar orqali fotometrik o’lchash usullari, fotometrik vaqt qatorlaridagi geometrik va fizik tashkil etuvchilarni aniqlash usullari, aniqlangan ma’lumotlarning fotometrik tahlili va olingan natijalarni standartlashtirish usullari.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliliigi** Quyosh tizimi kichik jismlari kuzatuv, kuzatuv ma’lumotlarga ishlov berish va tahlil qilishning zamonaviy tasdiqlangan usullarini qo’llash bilan, hamda dunyoning boshqa kuzatuv nuqtalarida olingan natijalar bilan taqqoslanganligi bilan asoslanadi.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

300 ga yaqin Quyosh tizimi kichik jismlarining kuzatuvlari o’tkazilib, noyob ma’lumotlar banki yaratilgan;

Umumiy hisobda 50 ga yaqin ob’yektlar ravshanlik egri chiziqlaridagi davriy tashkil etuvchilar o’rganilib, shundan 20 ta ob’yektning o’z o’qi atrofida aylanish davri qayta o’lchanib, aniqlashtirilgan bo’lsa, 8 ta ob’yektning o’z o’qi atrofida aylanish davri ilk marta aniqlangan;

458732 (2011 MD5) asteroidining qo’shaloq ekanligi, ya’ni uning o’z tabiiy yo’ldoshi borligi kashf qilingan va shu qo’shaloq tizimga tegishli bir qancha orbital va fizik parametrlar aniqlangan;



88710 (2001 SL9) asteroidini tabiiy yoʻldoshining orbital katta yarim oʻqi kamayib, unga qulab tushishga borayotgani va bu tizimga tegishli bir qancha orbital va fizik parametrlar aniqlangan;

NASA ning DART kosmik missiyasida kosmik kema bilan toʻqnashtirilgan Didymos-Dimorfos tizimi uchun taklif etilgan modellar - toʻqnashuvdan avvalgi va keyingi oʻzaro hodisalarning real kuzatuvlaridan olingan maʼlumotlari bilan solishtirilgan;

Toʻqqizta genetik juftliklarning haqiqatdan ham genetik juftlik ekanligi tasdiqlanib, ularga tegishli bir qancha fizik-orbital parametrlar aniqlangan;

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

Quyosh tizimi kichik jismlarining aniqlangan parametrlari Quyosh tizimi kelib chiqishi va evolyutsiyasi, shuningdek kichik jismlar populyatsiyasi va dinamikasini oʻrganish va nazariy modellarini takomillashtirish uchun qoʻllaniladi;

Kuzatuv, fotometriyalash va tahlil qilishning ishlab chiqilgan va qoʻllanilayotgan usullari Quyosh tizimining boshqa kichik jismlarini oʻrganish uchun poydevor boʻlib xizmat qiladi;

Bundan tashqari, dissertatsiyada olingan natijalarni Quyosh tizimi astronomiyasi va sayyorashunoslik boʻyicha universitetning maxsus kurslari dasturlariga kiritish mumkin;

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.**

Maydanak observatoriyasi teleskoplarida olib borilgan kuzatishlar asosida Quyosh tizimi kichik jismlarining noyob maʼlumotlar bazasi yaratildi;

Kuzatuvlardan olingan yakka, qoʻshaloq va genetik juftliklarga tegishli qimmatli maʼlumotlar Quyosh tizimida sodir boʻlayotgan fizik hodisalarni oʻrganish uchun asos boʻladi;

Shuningdek, dissertatsiyaning ilmiy va amaliy ahamiyati olingan kuzatuv maʼlumotlari bilan bevosita bogʻliq boʻlgani holda kelajakda shu va shunga oʻxshash obʼyektlarni oʻrganishda qoʻllaniladi;

**Tadqiqot natijalarining amalda qoʻllanishi.**

Dissertatsiyada ishlab chiqilgan tahlil usullari va oʻlchangan parametrlar oʻxshash obʼektlarni oʻrganishda boshqa mualliflar tomonidan qoʻllanilgan. Buni Web of Sciences, SCOPUS maʼlumotlar bazasiga va Google Scholar roʻyxatiga kiritilgan quyidagi xalqaro jurnallardagi nashrlarimizga havolalar tasdiqlaydi:

Oʻzaro genetik bogʻliq asteroid juftliklarini oʻrganish asosida tayyorlangan - Asteroid pairs: A complex picture. // Icarus, Volume 333, p. 429-463., 2019; maqolamizga (Yun Zhang va boshq. Nature communications 2022, J. Berthier va boshq. A&A 2023, Jin Beniyama va boshq. The Astrophysical Journal 2023, P. Fatka va boshq. MNRAS 2022, G. Voyatzis va boshq. Planetary and Space Science 2024 kabi ) **82** ta iqtibos keltirilgan;

Bir-birining atrofida aylanuvchi qoʻshaloq obʼyektlarni oʻrganish asosida tayyorlangan - A satellite orbit drift in binary near-Earth asteroids (66391) 1999 KW4 and (88710) 2001 SL9 - Indication of the BYORP effect. // Icarus, Volume 360 p114321., 2021; maqolamizga (R. Terik Daly va boshq. Nature 2023, Cristina A. Thomas va boshq. Nature 2023, Karolina Dziadura va boshq. A&A 2023,

Matija Cuk va boshq. The Planetary Science Journal 2021, F. Monterio va boshq. MNRAS 2021 kabi ) **26** ta iqtibos keltirilgan;

Yerga yaqinlashuvchi va potensial xavfli sifatida tasniflanuvchi 3200 Phaethon (1983 TB) asteroidini o'rganish asosida tayyorlangan - Optical observations of NEA 3200 Phaethon (1983 TB) during the 2017 apparition. // Astronomy & Astrophysics, Volume 619, id.A123, 8 pp., 2018; maqolamizga (J. Hanus va boshq. A&A 2018, P.A. Taylor va boshq. Planetary and Space Science 2019, J.R. Masiero va boshq. The Astronomical Journal 2019, N.N. Kiselev va boshq. MNRAS 2022, J.N. Purdum va boshq. The Astrophysical Journal Letters 2021 kabi ) **25** ta iqtibos keltirilgan;

Xorijiy mualliflar nashrlarida iqtibos keltirilgan ishlar soni 130 dan ortiqni tashkil etadi.

**Tadqiqot natijalarini approbatsiya qilish.** Tadqiqot natijalari O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Astronomiya instituti seminarlarida, shuningdek, 15 dan ortiq xalqaro va milliy konferensiyalarda muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarini e'lon qilanganligi.** Dissertatsiya mavzusi doirasida jami 30 ta ilmiy ish nashr qilingan, shulardan O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining asosiy ilmiy natijalarni chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 12 ta maqola, uning 4 tasi yuqori reyting va impakt faktorga ega xalqaro ilmiy jurnallarda chop etilgan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa va foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiyaning umumiy hajmi 137 betni tashkil etgan.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyani **kirish** qismida ish mavzusining dolzarbligi va zarurati asoslab berilgan. Ishning maqsad va vazifalari tavsiflangan. Tadqiqot natijalarining yangiligi va ishonchliligi, ilmiy va amaliy ahamiyati qayd etilgan.

**Birinchi bobda** Quyosh tizimi kichik jismlarining o'rganilish tarixi va tadqiqotlarning bugungi holati qisqacha bayon qilingan. Asteroidlarning o'z o'qi atrofida aylanishi va aylanishni o'zgartirishga majburlovchi mexanizmlar sanab o'tilgan. Gravitatsion va nogravitatsion kuchlarning aylanish va aylanish-parchalanish jarayonidagi roli, qo'shaloqlar va o'zaro genetik bog'liq juftliklar hosil bo'lish jarayoni qisqacha sharhlangan. Ushbu tadqiqot ishi doirasidagi kuzatuvlar statistikasi, to'plangan ma'lumotlar bazasi va foydalanilgan asbob-uskunalar haqida malumotlar keltirilgan.

Ushbu tadqiqot ishida Quyosh tizimi kichik jismlari kuzatuv ma'lumotlarining katta qismi 2012-2023 yillar oralig'ida Maydanak observatoriyasining teleskoplar yordamida olingan. Shuningdek, ayrim ob'yektlar kuzatuvlarida Samarqand va Parkent ilmiy o'quv observatoriyalari teleskoplaridan ham foydalanilgan. Kuzatuvlarda Maydanak observatoriyasi va Samarqand va Parkent ilmiy o'quv observatoriyalarning turli o'lchamdagi 6 ta teleskoplaridan foydalanilgan. Turli o'lchamlardagi AZT-22, Z-1000, NT-60, ST-60, GP-48 va AZT-14 kabi teleskoplar shular jumlasidandir.

Yuqorida sanab o‘tilgan teleskoplarda SI 600 (SNUCAM), FLI Micro Line 09000-65, FLI IMG1001E, Andor iKon-L 936, FLI ProLine 4710 va Bro Cam SITE005 kabi ZAQ (Zaryadli Aloqa Qurilmasi) kameralaridan foydalanilgan. Kuzatuvlarda Bessel tipidagi BVRI yorug‘lik filtrlaridan foydalanilgan.

Umumiy hisobda, Maydanak observatoriyasi, Samarqand va Parkent ilmiy-o‘quv observatoriyalarida 2012-2023 yillar davomida jami 300 ga yaqin Quyosh tizimi kichik jismlarining optik-raqamli kuzatuvlari olib borilgan. Kuzatuvlar natijasida hajmi 10 TB dan ortiq bo‘lgan Quyosh tizimi kichik jismlarining kuzatuv ma’lumotlari bazasi yaratilgan.

**Ikkinchi bobda** kuzatuv ma’lumotlarini qayta ishlash, tahlil qilish, instrumental va geometrik tashkil etuvchilarni hisobga olish, qisqartish, davriy tashkil etuvchilarni baholash usullari va ayrim natijalar keltirilgan.

Ushbu bobning birinchi paragrafi (§2.1) astrotasvirlarni qayta ishlash va fotometrik o‘lchashlarni amalga oshirishga bag‘ishlangan. Raqamli tasvirlarni birlamchi qayta ishlashda bias, dark va flat yordamchi tasvirlari hisobga olindi. Fotometrik o‘lchashlarni amalga oshirishda Signal-Shovqin nisbatining optimal qiymatlarini tekshirish orqali ob‘yekt va taqqoslov yulduzlari uchun diafragma va osmon foni halqalarining o‘lchamlari aniqlandi. Diafragmalar to‘g‘ri tanlangach, hisob kitoblardan uskuna kattaliklar olindi. Uskuna kattaliklarini tahlil qilish va standartlashtirishda “Differensial fotometriya” va “Absolyut fotometriya” usullaridan foydalanildi.

Ikkinchi paragrafda (§2.2) ravshanlik egri chiziqlaridagi geometrik tashkil etuvchilar muhokama qilinadi. Kuzatuv natijalaridagi bir kechalik o‘zgarishlar asosan asteroidning geometrik shakli va uning spin vektori bilan bog‘langan. Uzoq muddatli o‘zgarishlar tarkibi esa, masofa va Quyosh-Nishon-Kuzatuvchi geometriyasining o‘ziga xosliklarini ifodalaydi. Masofalarning ravshanlik egri chizig‘iga ta’sirini quyidagi tenglama yordamida hisobga olish mumkin:

$$V(a) = V - 5 \log(r * \Delta) \quad (1)$$

Bu yerda  $V(a)$  -  $a$  burchak uchun asteroidning hisoblangan yulduz kattaligi.  $r$  va  $\Delta$  esa mos ravishda Asteroid-Quyosh va Asteroid-Yer orasidagi masofalardir. Bundan tashqari asteroidlar ham xuddi Oy kabi fazalarga ega va buning ta’sirini hisobga olish lozim. Asteroidlar faza egri chiziqlari uchun bir qancha turli matematik yechimlar mavjud bo‘lib, ular ichida H,G kattaliklar faza funksiyasi 1985 yilda Xalqaro Astronomiya Ittifoqi tomonidan qabul qilingan:

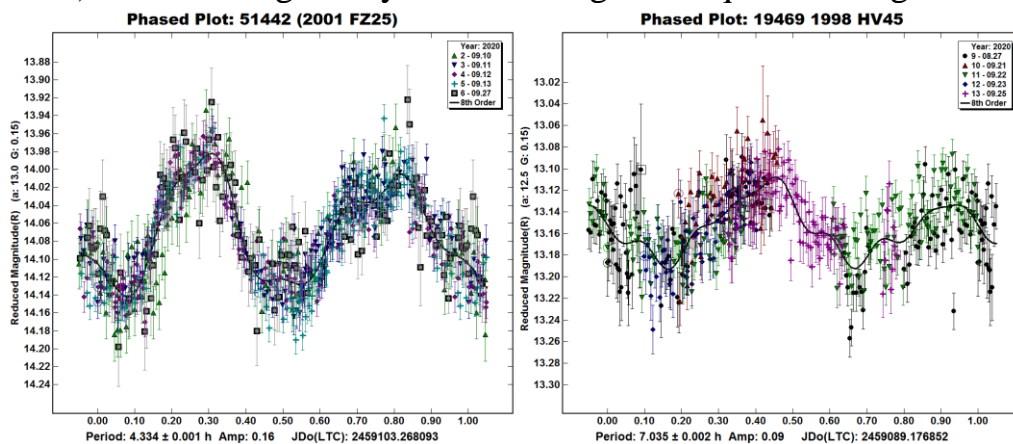
$$\begin{aligned} 10^{-0.4V(a)} &= \alpha_1 \Phi_1(a) + \alpha_2 \Phi_2(a) \\ &= 10^{-0.4H} [(1 - G)\Phi_1(a) + G\Phi_2(a)] \end{aligned} \quad (2)$$

bu yerda  $a$  faza burchagi,  $V(a)$  esa asteroidning masofa tashkil etuvchilaridan holi bo‘lgan  $a$  burchakdagi kattaligidir.  $\Phi_1, \Phi_2$  bazaviy funksiyalari trigonometrik funksiyalar orqali aniqlanadi.  $\alpha_1$  va  $\alpha_2$  koeffitsientlar emperik usulda kuzatishlar natijasidan olinadi.

Uchinchi paragrafda (§2.3) ravshanlik egri chiziqlaridagi davriy tashkil etuvchilarni aniqlashga qaratilgan tahlillar natijalari keltirilgan. Ravshanlik egri chiziqlaridagi davriy tashkil etuvchilar kichik jismlarning o‘z o‘qi atrofida aylanish davri va uning tabiiy yo‘ldoshlari tufayli hosil bo‘ladi. Bilamizki, Yerda olib boriladigan optik kuzatuvlar notekis va nochiziqli vaqt qatorlari sifatida

ifodalaniladi. Nochiziqli vaqt qatrolaridagi davriy tashkil etuvchilarni izlashning bir qator keng tarqalgan usullari mavjud. Lomb-Scargle periodogrammasi usuli (LS), Dispersion tahlil usuli (Analysis of variance - AOV), Spektrial quvvat usuli (Power-spectrum - PS), Faza dispersiyasini minimallashtirish usuli (phase dispersion minimization - PDM) va  $\chi^2$  usuli shular jumlasidandir.

Biz o'zida bir yoki bir qancha usullarni birlashtirgan dasturiy ta'minotlar orqali davriy tashkil etuvchilarni izlaganmiz. LS usuli orqali davriy tashkil etuvchilarni izlovchi, o'zimiz yozgan dasturiy ta'minotlar, Peranso, Period04 va MPO Canopus kabi dasturiy ta'minotlar orqali vaqt qatrolari tahlilini amalga oshirganmiz. Tahlillar natijasida 50 dan ortiq asteroidlar vaqt qatrolarida davriy tashkil etuvchilar mavjudligi aniqlangan. 20 dan ortiq asteroidlarning o'z o'qi atrofida aylanish davrlari qayta aniqlangan yoki aniqlashtirilgan. Bundan tashqari yana 8 ta asteroidlarning o'z o'qi atrofida aylanish davri ilk marta aniqlangan. Misol tariqasida 1-rasmda davri ilk marta aniqlangan 51442 (2001 FZ25) va 19469 (1998 HV45) asteroidining davriy ravshanlik egri chiziqlari keltirilgan.



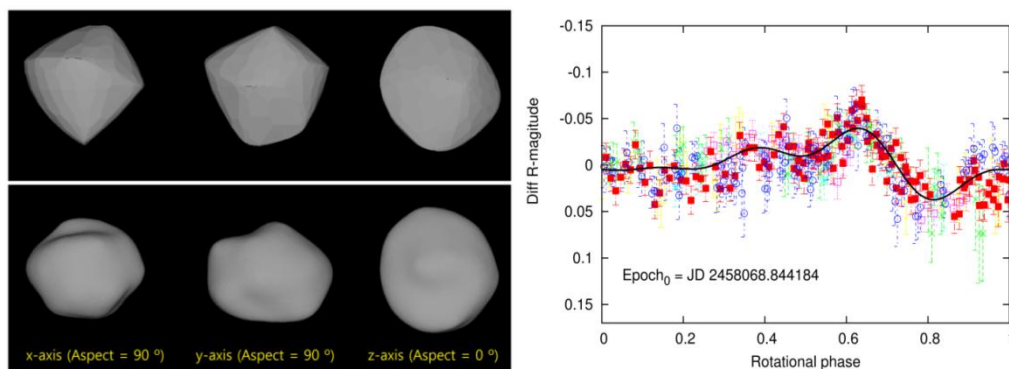
**1-rasm.** 51442 (2001 FZ25) va 19469 (1998 HV45) uchun olingan davriy ravshanlik egri chiziqlari.

To'rtinchi paragraf (§2.4) esa Yerga yaqinlashuvchi va Potensial xavfli asteroid sifatida tasniflangan 3200 Phaethon (1983 TB) ning kuzatuvlari natijalariga bag'ishlangan. U 2025-yilda Yaponiya kosmik tadqiqotlar agentligining Kosmos va Astronavtika fanlari instituti tomonidan uchirilishi mo'ljallangan DESTINY<sup>+</sup> missiyasining tadqiqot maqsadi hisoblanadi.

Phaethon kuzatuvlaridan yuqori sifatli zich fotometrik ma'lumotlarni olish imkoniyati 2017 yil oxirida paydo bo'ldi. O'shanda uning Yerga so'ngi 40 yil ichidagi eng yaqin yaqinlashishi edi. Biz ayni o'sha 2017-yilda aylanish xususiyatlarini o'rganish va qutb yechimini yaxshilash uchun Phaethonning fotometrik kuzatuv kompaniyasida ishtirok etdik. Kuzatuvlar Osiyo va Amerika qit'alarida joylashgan Maydanak va yana 7 ta observatoriyalar teleskoplaridan foydalangan holda olib borilgan.

Kuzatuv ma'lumotlari to'plamini tahlil qilib, biz ikkita mustaqil usul yordamida  $3,6039 \pm 0,0004$  soatlik sinodik aylanish davrini topib, Phaethonning kompozit ravshanlik egri chizig'ini oldik (2-rasm o'ng panel). Ravshanlik egri chizig'ining amplitudasi  $0,095 \pm 0,035$  magnitudani tashkil qildi. Bunday kichik amplituda deyarli sferik shakl sifatida qabul qilinadi. Bundan tashqari, biz

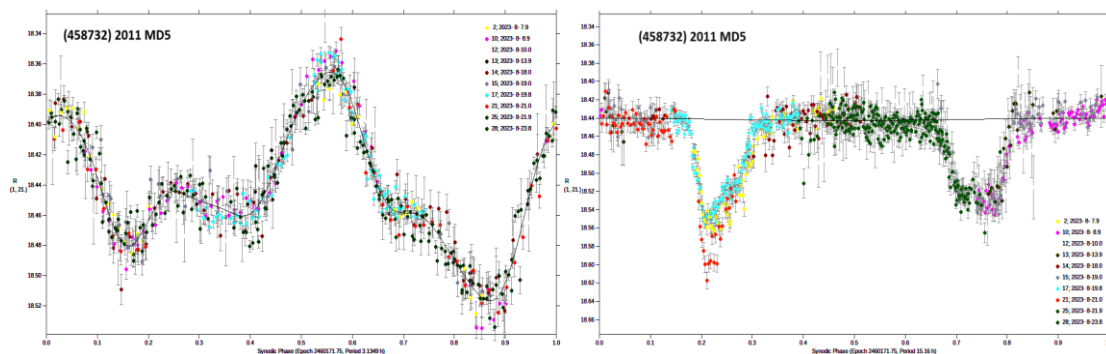
ravshanlik egri chiziqlari inversiyasi LI (Lightcurve Inversion) usuli va SAGE (Shaping Asteroids with Genetic Evolution) algoritmi yordamida 3,603957 va 3,603956 soat siderik aylanish davrlarini va mos ravishda ( $308^\circ$ ,  $-52^\circ$ ) va ( $322^\circ$ ,  $-40^\circ$ ) qutb orientatsiyalarini oldik. Ikkala usuldan ham 3D shakl modellari olindi (2-rasm chap panellar). Ushbu tadqiqotda olingan shakl modeli va qutb ma'lumotlari nafaqat Phaethonning keyingi tadqiqotlari uchun, balki asteroidga yuborish mo'ljallanayotgan DESTINY<sup>+</sup> missiyasi uchun ham kerakli ma'lumotlarni taqdim etadi.



**2-rasm.** Phaethon uchun LI (chap yuqori panel) va SAGE (chap pastki panel) modellari va davriy ravshanlik egri chiziqlari (o'ng panel).

**Uchunchi bob** 458732 (2011 MD5), 88710 (2001 SL9) va 65803 Didymos (1996 GT) kabi qo'shaloq asteroid tizimlari tadqiqotlari natijalarini aks ettiradi. Tadqiqot ishida bu qo'shaloq asteroid tizimlaridan birinchisining qo'shaloqlik fakti ilk marta qayd etilgan. Ikkinchisining orbital dinamikasida tabiiy jarayonlar tufayli o'zgarishlar aniqlangan bo'lsa, uchinchisining orbital dinamikasidagi o'zgarishlar DART kosmik kemasi bilan to'qnashuv tufayli sodir bo'lgan.

Birinchi paragrafda (§3.1) 458732 (2011 MD5) kuzatuvlari va qo'shaloqlik faktining aniqlanishi sharhlanadi. Yerga yaqinlashuvchi va Apollonlar guruhi tarkibiga kiruvchi bu asteroid Maydanak observatoriyasida 2023-yilning avgust-sentyabr oylarida jami 6 kecha davomida R filtrda 120 dan 60 sekundga qadar bo'lgan ekspozitsiya vaqtlarida kuzatilgan. Ravshanlik egri chiziqlari dekompozitsiyasining sifatini yaxshilash uchun sentyabr oyida zich nuqtalar qatorini olish maqsadida ekspozitsiya vaqti 6 sekundga qadar kamaytirilgan.



**3-rasm.** 458732 (2011 MD5) aylanish (chapda) va qo'shaloq tizimi (o'ngda) ravshanlik egri chiziqlari.

Tahlillar orqali vaqt qatorida 3 soatdan ortiqroq davriylikdagi tashkil etuvchi aniqlandi. Uning o'z o'qi atrofidagi aylanish davri ilk marta topildi va

$3.1350 \pm 0.0006$  soatga teng bo'lib chiqdi (3-rasm chap paneli). Asteroid aylanishining ravshanlik egri chizig'idagi amplitudasi R filtrda 0.15 Magnitudani tashkil etadi. Bu uning sferoidga yaqin shalkdagi tez aylanuvchi jism ekanligini bildiradi.

Tahlillar umumiy ravshanlik egri chizig'ida kattaroq davrga ega yana bitta tashkil etuvchi borligini ko'rsatdi. Bu tashkil etuvchi standart dekompozitsiya usullari orqali ajratib olinib (3-rasm o'ng paneli) tahlil qilinganida, 458732 (2011 MD5) asteroidi qo'shaloq asteroid ekanligi ma'lum bo'ldi. Shunday qilib, ilk marta 458732 (2011 MD5) asteroidining o'z yo'ldishi bor ekanligi aniqlandi. Ushbu qo'shaloq tizim to'siluvchan ko'rinma geometriyaga ega bo'lib, uning yo'ldoshi asteroid atrofidagi orbita bo'ylab har  $15.16 \pm 0.02$  soatda bir marta aylanib chiqishi aniqlandi. Yo'ldoshning orbital harakati turlicha o'zaro hodisalar chuqurligiga ega: Eclipse -  $0.09^m$  ga va Okkultatsiya -  $0.16^m$  ga, diametrlar nisbati ( $D_2/D_1$ ) esa  $0.29 \pm 0.02$  ga teng.

Ikkinchi paragrafda (§3.2) Yerga yaqinlashuvchi 88710 (2001 SL9) qo'shaloq asteroid tizimining kuzatuvlari va orbital dinamikasi bayon qilingan. Tahlillarda uning 2001 yildan 2015 yilgacha bo'lgan vaqt oralig'ida 5 ta ro'para turishlar yaqinidagi jami 40 kechalik kuzatuv ma'lumotlaridan foydalanilgan. Kuzatuvlar turli yillarda Maydanak, La Silla, U. Hawaii, Ondrejov, Abastumani, Lowell, Simeiz va Palmer Divide kabi dunyoning 8 ta observatoriyasi hududidan olib borilgan. Olingan kuzatuv ma'lumotlari 88710 (2001 SL9) qo'shaloq asteroid tizimi uchun eng uzun qamrovdagi fotometrik ma'lumotlar to'plami bo'lib, kichik qo'shaloq asteroidlar komponentlarining o'zaro orbital evolyutsiyalarini o'rganish uchun noyob imkoniyatdir. Ma'lumotlar ikki davrli Furye qatorini o'zaro hodisalardan tashqaridagi ma'lumotlar nuqtalariga moslashtirish orqali tashkil etuvchilar: asosiy (qisqa davrli) va ikkilamchi (uzoq davrli) davriy ravshanlik egri chiziqlariga ajratildi. O'zaro hodisalarni o'z ichiga olgan uzoq davrli component raqamli modellashtirish uchun foydalanildi.

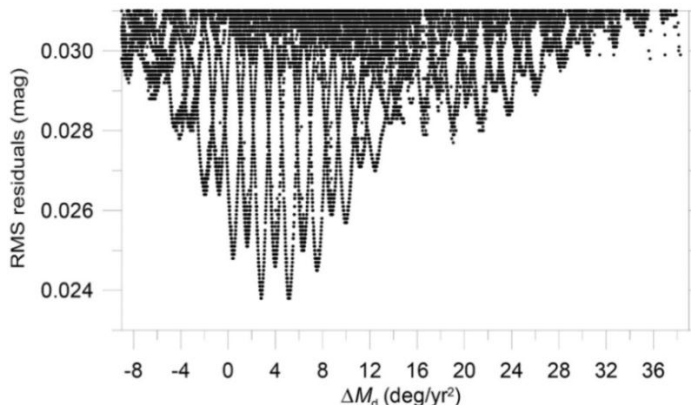
Biz Scheirich va Pravec (2009) texnikasidan foydalangan holda (88710) 2001 SL9 qo'shaloq asteroid tizimining modelini yaratdik. Ular apsidal pretsessiya bilan Kepler orbitasida bir-birining atrofida aylanib, o'rtacha anomaliyada kvadratik drift (siljish) ga imkon beradi. O'rtacha anomaliyadagi kvadratik siljish,  $\Delta M_d$  mustaqil parametr sifatida o'rnatilgan. Bu holatda vaqt bo'yicha o'zgaruvchi o'rtacha anomaliya quyidagiga teng:

$$M(t) = M(t_0) + n(t - t_0) + \Delta M_d(t - t_0)^2; \quad \Delta M_d = \frac{1}{2} \dot{n}; \quad (3)$$

Bu yerda  $n$  - o'rtacha harakat,  $t$  - vaqt va  $t_0$  - nolinch epoha.  $\Delta M_d$  (88710) 2001 SL9 uchun -9 dan +39 daraja/yil<sup>2</sup> gacha oraliqda tekshirilgan va boshqa barcha parametrlar har bir qadamda o'rnatilgan.  $\Delta M_d$  dagi qadamlar 0,01 daraja/yil<sup>2</sup> kattaligida tanlangan. O'rtacha kvadratik chetlanish (RMS) qoldiqlarining  $\Delta M_d$  ga nisbatan grafigi 4-rasmda ko'rsatilgan.

$\Delta M_d$  uchun olingan beshta eng yaxshi minimal RMS qoldiqlar mos ravishda 0.0238, 0.0238, 0.0245, 0.0246 va 0.0248, magnitudaga teng bo'lgan. Birinchi ikkita yechim ma'lumotlarda qoniqarli moslikni ta'minlaydi, ulardan biri qo'shaloq asteroid parametrlari uchun haqiqiy yechimdir. Ammo biz mavjud

ma'lumotlar bilan ushbu ikki yechimdan birining foydasiga hukm chiqara olmaymiz. RMS qoldiqlari yuqori bo'lgan qolgan uchta yechim kuzatuv ma'lumotlarga sezilarli darajada yomon moslashgan va ularning real yechimlardan uzoqligi aniq.



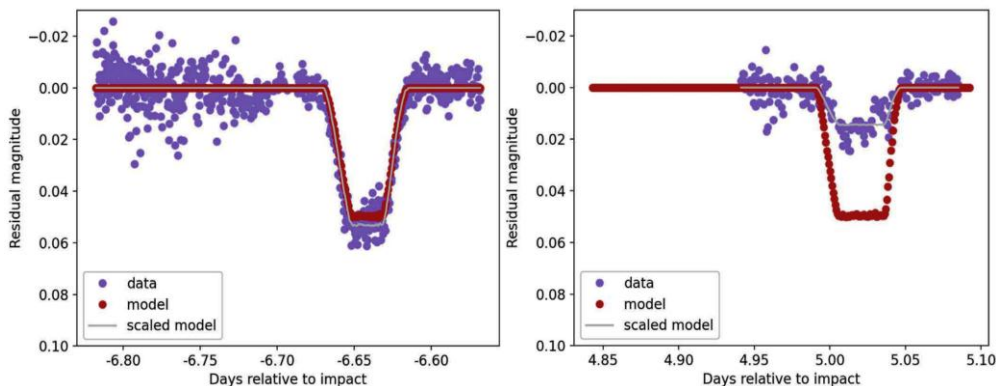
**4-rasm.** RMS qoldiqlarining  $\Delta M_d$  ga nisbatan grafigi.

Xulosa qilib aytganda, biz (88710) 2001 SL9 uchun deyarli 14 yil davomida beshta ko'rinishda olingan fotometrik kuzatishlarimiz ma'lumotlari orqali qo'shaloq tizim o'zaro orbitasining uzoq muddatli evolyutsiyasini o'rgandik. Uning o'zaro orbitasi ekliptik koordinatalar qutbi (L,B)=(302°, -73°) ekanligini va orbitaning o'zi aylanaga yaqin ( $e < 0,07$ ) ekanligi topildi. Biz uning o'zaro orbitasining katta yarim o'qi (taxminan  $\sim 1,6$  km)  $-2,8 \pm 0,2$  yoki  $-5,1 \pm 0,2$  sm/yil ( $\Delta M_d$  uchun mos ravishda 2.8 va 5.2 daraja/yil<sup>2</sup>) tezlik bilan qisqarayotganini aniqladik.

Uchinchi (§3.3) va to'rtinchi (§3.4) paragraflarda 65803 Didymos (1996 GT) qo'shaloq asteroid tizimiga DART (Double Asteroid Redirection Test) kosmik missiyasining to'qnashtirilishi doirasidagi kuzatuvlari va tahlillari keltirilgan. 2022-yil 26-sentyabrda DART kosmik missiyasi Yerga yaqinlashuvchi qo'shaloq asteroid (65803) Didimosning tabiiy yo'ldoshi Dimorfosga zarba berdi. Bu Dimorfosning orbital davrini 33 daqiqaga o'zgartirib, sayyoramizni himoya qilishda kinetik ta'sir vositasining samaradorligini ko'rsatdi. To'qnashuvga qadar Didimosning o'z o'qi atrofida aylanish davri  $= 2,2600 \pm 0,0001$  soat, Dimorfosning Didymos atrofidagi orbital aylanish davri esa  $= 11,921481 \pm 0,000016$  soat bo'lgan. To'qnashuvdan so'ng Dimorfos uchun yangi orbital davr  $= 11,372 \pm 0,017$  soatni tashkil etdi.

Hammasi bo'lib, Maydanak va yana 27 ta observatoriya DART ravshanlik egri chiziqlari kuzatuv kampaniyasining bir qismi sifatida qabul qilingan ma'lumotlarni olishda ishtirok etdi. Bu 2022 yilning iyulidan 2023 yilning fevraligacha aniqlangan yuzlab o'zaro hodisalarga ega 224 ta ravshanlik egri chizig'idan iborat katta ma'lumotlar to'plami demakdir. Foydalanilgan teleskoplarning diametri 0,5 metrdan 6,5 metrgacha bo'lgan va turli xil ZAQ kameralaridan foydalanilgan. To'qnashuv natijalarini o'z ichiga olgan qariyb 8 oylik ma'lumotlar bilan biz o'zaro hodisalarning modellarga nisbatan evolyutsiyasini baholadik. Ushbu tahlil uchun ishlatiladigan fotometrik modelning tafsilotlari Naidu va boshqalar (2023) da keltirilgan. Ushbu model, birinchi navbatda, parchalangan (uzlukli) ravshanlik egri chizig'idan o'zaro hodisalar

vaqtlarini aniqlashni osonlashtirish uchun ishlab chiqilgan. Model Daly va boshq. (2023) tomonidan aniqlangan hajmlar asosida Dimorfos va Didimos uchun aylana simmetrik ellipsoid shakllaridan foydalangan. Ushbu model o‘zaro hodisalarning vaqti va morfologiyasi (shakli, chuqurligi) uchun real bashoratlarni ishlab chiqadi.



**5-rasm.** To‘qnashuvdan oldingi (chapda) va keyingi (o‘ngda) kuzatuv ma’lumotlarini modellar bilan solishtirish.

Yuqoridagi 5-rasmda to‘qnashuvdan oldingi va keyingi ravshanlik egri chiziqlaridagi o‘zaro hodisalar model bilan solishtirilgani ko‘rsatilgan. Bunday hollarda hodisalarning vaqti va sifati modellar tomonidan yaxshi ifodalangan. Biroq, Naidu va boshqalar (2023) ning o‘zaro hodisalar modellari haddan tashqari chuqur. To‘qnashuvdan keyingi ma’lumotlarda modellar o‘zaro hodisalarning chuqurligini ortiqcha bashorat qiladi, bu farq tizimdagi qoldiq tashlanmalarning ta’siri bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin.

**To‘rtinchi bobda** bir-biriga juda o‘xshash geliosentrik orbitalarda harakatlanuvchi o‘zaro genetik bog‘liq asteroid juftliklari tadqiqotlari berilgan. Ushbu bobning birinchi (§4.1) va ikkinchi (§4.2) paragraflarida mos ravishda asteroid juftliklarini aniqlash, tadqiqot uchun tanlash mexanizmlari va har bir juftlikning kuzatuv va tahlili natijalari keltirilgan.

Biz Pravec va Vokrouhlicky (2009) usulidan foydalangan holda o‘rtacha orbital elementlarning ( $a$ ,  $e$ ,  $i$ ,  $\bar{\omega}$ ,  $\Omega$ ) besh o‘lchovli fazosida asteroid masofalarining taqsimlanishini tahlil qilish orqali nomzod asteroid juftlarini aniqladik. Ikki asteroid orbitasi orasidagi masofa ( $d_{mean}$ ) quyidagi musbat-aniq kvadratik shakl bilan hisoblangan:

$$\left(\frac{d_{mean}}{na}\right)^2 = k_a \left(\frac{\delta a}{a}\right)^2 + k_e (\delta e)^2 + k_i (\delta \sin i)^2 + k_\Omega (\delta \Omega)^2 + k_{\bar{\omega}} (\delta \bar{\omega})^2 \quad (4)$$

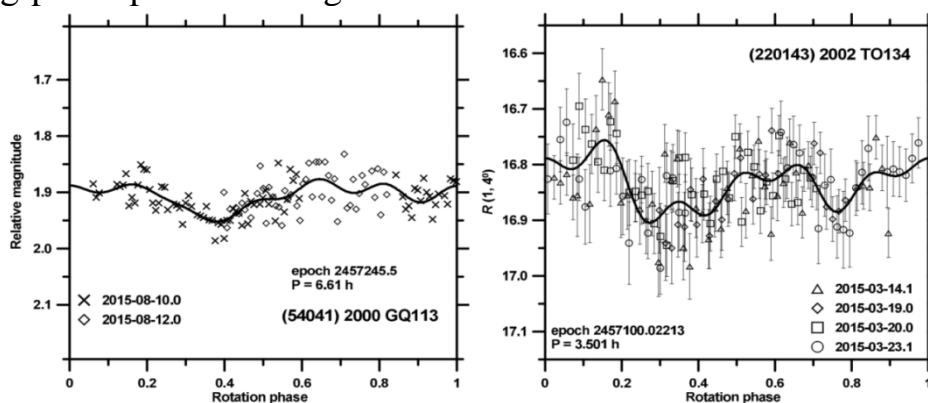
Bu yerda  $n$  va  $a$  ikki asteroiddan birortasining o‘rtacha harakati va katta yarim o‘qi, shuningdek ( $\delta a$ ,  $\delta e$ ,  $\delta \sin i$ ,  $\delta \bar{\omega}$ ,  $\delta \Omega$ ) ularning o‘rtacha orbital elementlarini ajratish vektori. Zappala va boshqalar (1990), Pravec va Vokrouhlicky (2009) dan so‘ng biz  $k_a = 5/4$ ,  $k_i = 2$ , va  $k_{\bar{\omega}} = k_\Omega = 10^{-4}$  qiymatlardan foydalandik. Ikki asteroid orbitasi orasidagi masofa  $d_{mean}$  asteroidlar nisbiy tezligining taxminiy o‘lchovidir. Aksariyat asteroid juftlari uchun u bir necha  $10^{-1}$  dan bir necha  $10^1$  m/s gacha oraliqda bo‘ladi.

Biz 93 ta asteroid juftlarini ko‘rib chiqdik. Maydanak observatoriyasi kuzatuv imkoniyatlari va hamkor observatoriyalar kuzatuv ma’lumotlarini hisobga

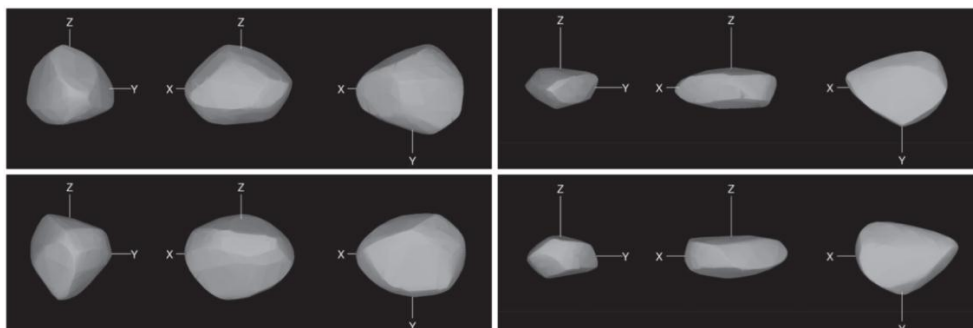


olgan holda, 9 ta juftlik kuzatuvlar uchun tanlab olindi (1-jadval). 9 juft asteroiddan iborat tanlovimizning fotometrik kuzatuvlarini o'tkazdik va ravshanlik egri chiziqlaridan iborat fotometrik ma'lumotlarni to'pladik. Ma'lumotlar birlamchi va ikkilamchilarning aylanish davrlari ( $P_1, P_2$ ) va o'rtacha kuzatilgan ravshanlik egri chiziqlari amplitudalarini ( $A_1, A_2$ ) olishni ta'minladi. Misol tariqasida, 6-rasmda juftliklardan birining har ikkala a'zosi uchun olingan davriy ravshanlik egri chiziqlari keltirilgan.

Aksariyat birlamchi va ba'zi ikkilamchi ob'ektlar uchun biz ularning aniq absolyut yulduz kattaliklarini ham oldik. Bundan biz ularning  $\Delta H=(H_2-H_1)$  qiymatlarini hisoblab chiqdik. Asteroid juftligining massalari nisbati  $q$  uning  $\Delta H$  qiymatidan  $q = 10^{-0.6\Delta H}$  formula orqali baholandi. Bundan tashqari, juftliklarning ko'pchilik a'zolari uchun (V-R) rang ko'rsatkichlari ham olingan. Ma'lumotlar yetarli bo'lganda, ayrim juftliklar a'zolarining qutb yechimlari va CONVEX shakl modellari olindi. Misol tariqasida, 7-rasmda juftliklardan birining har ikkala a'zosi uchun olingan shakl modellari keltirilgan. Unda (2110) Moore-Sitterlyga tegishli CONVEX shakl modellari qutb yechimlari  $(L_1, B_1)=(91^\circ, -75^\circ)$  uchun chap-yuqori panel va  $(L_1, B_1)=(270^\circ, -77^\circ)$  uchun chap-pastki panelda berilgan. (44612) 1999 RP27 ga tegishli CONVEX shakl modellari esa qutb yechimlari  $(L_2, B_2)=(8^\circ, -73^\circ)$  uchun o'ng-yuqori panel va  $(L_2, B_2)=(193^\circ, -69^\circ)$  uchun o'ng-pastki panelda berilgan.



**6-rasm.** (54041) 2000 GQ113 (chapda) va (220143) 2002 TO134 (o'ngda) davriy ravshanlik egri chiziqlari.



**7-rasm.** (2110) Moore-Sitterly (chapda) va (44612) 1999 RP27 (o'ngda) uchun ikkitadan CONVEX shakl modellari

Juftlik a'zolicini tasdiqlash uchun, biz geometrik klonlar to'plamini (har bir asteroid uchun 1000 klon) birlashtirdik. Yarkovskiy effekti har bir klona boshqacha ta'sir qiladi. Yarkovskiy effekti katta yarim o'qda  $\dot{a}_{Yark}$  asriy

o‘zgarishlarni ta‘minlaydigan kattalik bilan klona ta‘sir qiluvchi soxta ko‘ndalang tezlashuv yordamida ifodalangan (Farnocchia va boshq, 2013). U  $\langle -\dot{a}_{max}, \dot{a}_{max} \rangle$  diapazonidan tanlangan, bu yerda  $\dot{a}_{max}$  asteroid o‘lchamidan hisoblangan (qarang: Vokrouhlicky, 1999). Bizning ortga orbital integratsiyalarimizdan maqsad - juftlik a‘zolarining klonlari o‘rtasida past tezlikdagi eng yaqin to‘qnashuvlarni topish edi.

Raqamli integratsiya uchun biz REBOUND paketidagi (Rein va Liu, 2012) Wisdom-Holman simplektik integrator WHFast (Rein va Tamayo, 2015) dan foydalandik. Biz Yarkovskiy effektini Nesvorniy va Vokrouhlicky (2006) dan olib, kodga kiritdik. Biz Quyoshning tortishish kuchi, 8 ta asosiy sayyora, ikkita mitti sayyora Pluton va Ceres va ikkita yirik asteroid Vesta va Palladaning ta‘sirini hisobga oldik. Hisoblashlarda biz olti soatlik vaqt-qadamini tanladik, bu simulyatsiyamizda to‘qnashuvlarni aniqlash imkonini beradi. Har bir geometrik klona  $\langle -\dot{a}_{max}, \dot{a}_{max} \rangle$  diapazonidan  $\dot{a}_{Yark}$  ning tasodifiy qiymati berilgan. Har bir juftlik uchun biz ularning klonlari orasidagi to‘qnashuvlargacha o‘tgan vaqtlarini - ikkilamchini asosiydan ajratishdan keyingi vaqt  $T_{sep}$  ni hisobladik. Tanlangan va kuzatilgan juftliklarning geliotsentrik orbitalarini orqaga integratsiyasi yordamida baholangan juftliklar yoshining umumiy ro‘yxati 1-jadvalda keltirilgan.

**1-jadval.** Juftliklarning o‘zaro orbital masofalari va hisoblangan yoshi.

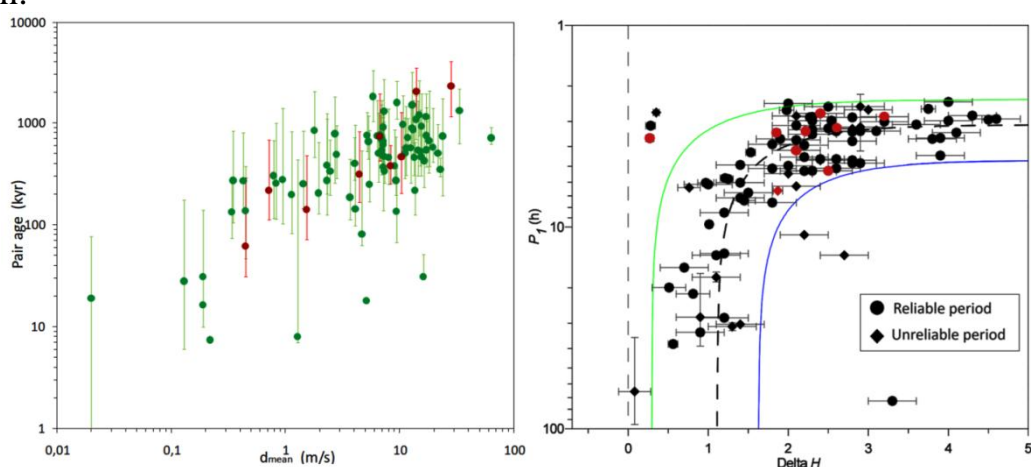
№	Birlamchi	Ikkilamchi	$d_{mean}$ (m/s)	Yosh (kyil)
1	(2110)	(44612)	14.08	$2042^{+1413}_{-896}$
2	(17198)	(229056)	4.44	$313^{+507}_{-146}$
3	(42946)	(165548)	6.68	$739^{+1189}_{-314}$
4	(54041)	(220143)	0.72	$217^{+467}_{-105}$
5	(60677)	(142131)	1.54	$141^{+338}_{-69}$
6	(13284)	(154828)	28.29	$2304^{+1749}_{-1154}$
7	(70511)	(462176)	8.32	$380^{+222}_{-125}$
8	(88259)	(337181)	0.45	$62^{+227}_{-31}$
9	(105247)	2009 SZ67	10.40	$466^{+802}_{-261}$

Juftliklar yoshining aniqlangan qiymatlari 60 kyr dan 2 Myr gacha bo‘lgan oraliqda yotadi. Juftliklarning hisoblangan nominal yoshi  $T_{sep}$  va juftlik a‘zolarining o‘rtacha orbital elementlar fazosidagi masofasi  $d_{mean}$  o‘rtasida o‘zaro korrelyatsiya mavjud. 8-rasm chap panelda biz tomonimizdan (grafikdagi qizil nuqtalar) va boshqa mualliflar tomonidan (grafikdagi yashil nuqtalar) o‘rganilgan 89 ta asteroid juftliklari yoshi va ular o‘rtasidagi umumiy orbital masofa jihatidan o‘zaro korrelyatsiyasi tasvirlangan. Grafikdan ikki miqdor o‘rtasida aniq korrelyatsiya borligi ko‘rinib turibdi. Olingan eng mos quvvat funksiyasi:

$$d_{mean} \left( \frac{m}{s} \right) = \left( \frac{T_{sep}}{160 \text{ kyr}} \right)^{1.87} \quad (5)$$

Ayrim asteroid juftlari uchun empirik va turli darajadagi orbital tartibsizliklar va ularning yoshini baholash noaniqliklari ta‘sir qilsa-da, bunday bog‘liqlik aslida juda kichik orbital masofalarda hosil bo‘lgan asteroid juftliklari uchun o‘rinli. Pravec va boshqalar (2010) asteroid juftliklari birlamchilarining aylanish chastotalari va asteroid juftliklari massalari nisbati o‘rtasidagi bog‘liqlikni topgan. Ushbu tendensiya 32 ta asteroid juftliklari parametrlarini o‘rganish orqali topilgan edi. Biz kuzatgan 9 ta asteroid juftining 8 tasi Pravec va boshqalar (2010)

tomonidan topilgan birlamchining aylanish davri va massa nisbati tendentsiyasiga mos kelishini aniqladik. Faqat (60677) 2000 GO18 va (142131) 2002 RV11 juftligining parametrlari asosiy aylanish davri va massa nisbati tendentsiyasidan chetga chiqadi. Bu aylanish-bo‘linish orqali juftliklar hosil bo‘lish nazariyasiga to‘liq mos emasdek ko‘rinadi. Qamrovni orttirish maqsadida hozirga qadar batafsil o‘rganilgan barcha juftliklar, ya’ni 93 ta asteroid juftligi uchun birlamchining davri ( $P_1$ ) va juftlik massalari nisbati ( $q$ ) ma’lumotlarini quyidagi 8-rasm o‘ng panelda keltirilgan. Rasmda massalar nisbati ( $q$ ) absolyut yulduz kattaliklari farqi ( $\Delta H$ ) sifatida ifodalangan va Maydanak observatoriyasi kuzatuvlari asosida biz o‘rgangan juftliklar qizil rangda berilgan. Bundan biz 93 ta asteroid juftining 86 tasi Pravec va boshqalar (2010) tomonidan topilgan birlamchining aylanish davri va massalar nisbati tendentsiyasi ( $P_1$ - $q$  munosabat) ga mos kelishini ko‘rishimiz mumkin.



**8-rasm.** Juftlik yoshi ( $T_{sep}$ ) va masofasi ( $d_{mean}$ ) o‘rtasidagi korrelyatsiya (chapda), birlamchilar aylanish davrlari ( $P_1$ ) va asteroid juftlarining absolyut yulduz kattaliklari farqi ( $\Delta H$ ) o‘rtasidagi munosabatlar (o‘ngda).

Yuqoridagi 8-rasmda doiralar birlamchilarining davrlari ishonchli tarzda aniqlangan juftliklar. Romblar esa, bir aylanish uchun kuzatilgan ravshanlik egri chizig‘i maksimal/minimallar (o‘rkachlar) sonining noaniqligi tufayli, birlamchilar davrlari odatda 1,5 faktor bilan noaniq bo‘lgan juftliklardir. Qora uzuq chiziq (punktir) aylanish-parchalanish orqali asteroid juftlarini hosil qilish nazariyasidan hisoblangan birlamchi davri va massa nisbati o‘rtasidagi nominal bog‘liqlik. Yashil va ko‘k egri chiziqlar Pravec va boshqalar (2010, 2018) da olingan asosiy aylanish chastotasi bo‘yicha nazariy chegaralar. Ushbu parametrlar to‘plamini juftliklar parametrlarining eng yaxshi ifodasi deb hisoblash mumkin.

Qayd etish lozimki, olingan ravshanlik egri chiziqlari tahlilidan ma’lum bo‘lishicha, bu ob’yektlarning barchasi faqat bitta asosiy o‘q atrofida aylanadi. Noasosiy o‘qda ham aylanuvchi ob’yektlar aniqlanmadi. Bu esa, o‘rganilgan ushbu ob’yektlar yaqin orada to‘qnashuvlarga uchramaganligini va o‘zaro genetik bog‘liq asteroid juftliklari faqat aylanish parchalanish yo‘li bilan hosil bo‘lganligini yana bir bor tasdiqlaydi.

## XULOSA

Falsafa doktori (PhD) ilmiy darajasini olish uchun yozilgan “**Quyosh tizimi kichik jismlarining orbital va fizik parametrlarini tadqiq etish**” dissertatsiya ishi tadqiqotlaridan quyidagi asosiy natijalar olingan:

1. 2012-2023 yillar davomida O‘zR FA AI Maydanak observatoriyasida 300 ga yaqin ob‘yektlarning kuzatuvlari o‘tkazilib, Quyosh tizimi kichik jismlarining noyob ma‘lumotlar bazasi yaratildi;
2. Raqamli tasvirlarga ishlov berish, fotometrik o‘lchovlarni amalga oshirish, geometrik va instrumental tashkil etuvchilarni hisobga olish metodlari takomillashtirilib, “pipeline” lar tayyorlandi;
3. Umumiy hisobda 50 ga yaqin ob‘yektlar ravshanlik egri chiziqlaridagi davriy tashkil etuvchilar o‘rganilib, shundan 20 ta ob‘yektning o‘z o‘qi atrofida aylanish davri qayta o‘lchanib, aniqlashtirilgan bo‘lsa, 8 ta ob‘yektning o‘z o‘qi atrofida aylanish davri ilk marta aniqlandi;
4. 3200 Phaethon (1983 TB) asteroidining ekliptik koordinatalar tizimidagi aylanish o‘qining yo‘nalishi ( $308^\circ$ ,  $-52^\circ$ ) va ( $322^\circ$ ,  $-40^\circ$ ) - mos ravishda ikki mustaqil metodlar LI usuli va SAGE algoritmi yordamida aniqlandi. Har ikki usuldan ham asteroidning uch o‘lchamli shakl modeli olindi. Ushbu tadqiqot doirasida olingan shakl modeli va qutb o‘qining yo‘nalishi asteroidga yuborilishi mo‘ljallanayotgan DESTINY+ kosmik missiyasi uchun juda muhim ma‘lumotlarni taqdim etadi.
5. 458732 (2011 MD5) asteroidining qo‘shaloq ekanligi, ya‘ni uning o‘z tabiiy yo‘ldoshi borligi kashf qilindi va shu qo‘shaloq tizimga tegishli bir qancha orbital va fizik parametrlari topildi. Uning o‘z o‘qi atrofida aylanish davri  $3.1350 \pm 0.0006$  soatga, yo‘ldoshining orbital davri esa  $15.16 \pm 0.02$  soatga tengligi aniqlandi;
6. 88710 (2001 SL9) asteroidi tabiiy yo‘ldoshining orbital katta yarim o‘qi -  $2,8 \pm 0,2$  yoki  $-5,1 \pm 0,2$  sm/yil tezlik bilan kamayib, unga qulab tushishga borayotgani va bu qo‘shaloq tizimga tegishli yana bir qancha orbital va fizik parametrlar aniqlandi;
7. NASA ning DART (Double Asteroid Redirection Test) kosmik missiyasida kosmik kema bilan to‘qnashtirilgan Didymos-Dimorfos tizimi uchun taklif etilgan modellar to‘qnashuvdan keyingi jarayonlarning real kuzatuvlaridan olingan ma‘lumotlar bilan mos kelmasligi, ya‘ni ta‘sirdan keyingi ma‘lumotlardagi o‘zaro hodisalar chuqurligi model bashoratlariga qaraganda sayozroq ekanligi aniqlandi;
8. To‘qqizta genetik juftliklarning haqiqatdan ham genetik juftlik ekanligi tasdiqlanib, ularga tegishli bir qancha fizik-orbital parametrlar aniqlandi. Juftlik yoshi va juftlik a‘zolarining o‘rtacha orbital elementlar fazosidagi masofasi o‘rtasidagi o‘zaro korrelyatsiya, shuningdek, birlamchilarning aylanish davri ( $P_1$ ) (ikkalasidan kattarog‘i) va o‘zaro massa nisbatlari o‘rtasidagi bog‘liqlik diagrammasidagi o‘rni o‘rganildi;

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ PhD.02/20.12.2019.FM.15.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ ПРИ АСТРОНОМИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**  
**АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ АН РУЗ**

**ЭРГАШЕВ КАМОЛИДДИН ЭШТУРСУНОВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНЫХ И ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ**

**01.03.01 – Астрономия**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО ФИЗИКО-  
МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

**Ташкент – 2024**

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан под номером B2024.2.PhD/FMxxx.

Диссертация выполнена в Астрономическом институте АН РУз.

Автореферат диссертации на трех языках (русском, узбекском и короткая аннотация на английском) размещён на веб-странице Научного совета ([www.astrin.uz](http://www.astrin.uz)) и Информационно-образовательном портале “Ziyonet” ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Научный руководитель:** Эгамбердиев Шухрат Абдуманнапович,  
Доктор физико-математических наук, Академик

**Официальные оппоненты:** Йулдошев Кудратилло Хабибуллаевич,  
Доктор философии (PhD) АИ АН РУз

Ахунов Тальят Ахматович,  
Доктор физико-математических наук НУУз

**Ведущая организации:** Астрофизический институт  
имени Фесенкова, Казахстан

Защита диссертации состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании Научного совета PhD.xx/xx.xx.2024.FM.15.01 при Астрономическом институте (Адрес: Астрономическая, 33, 100052, г. Ташкент. Тел.: (+99871) 235-81-02; факс: (+99871) 234-48-67; e-mail: info@astrin.uz)

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Астрономическом институте (регистрационный номер \_\_\_\_\_) по адресу: 100052, г. Ташкент. Астрономическая, 33, Астрономический институт, тел.: (+99871) 235-81-02).

Автореферат диссертации разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024 г.  
(Реестр протокола рассылки № \_\_\_\_\_ от “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024 г.)

**Д.Ш. Фаилова**  
Заместитель председателя Научного совета  
по присуждению ученой степени, д.ф.-м.н., профессор

**И.А. Ибрагимов**  
ученый секретарь Научного совета по  
присуждению ученой степени, к.ф.-м.н.

**А.Б. Абдикамалов**  
председатель научного семинара при Научном  
совете по присуждению ученой степени, д.ф.-м.н.

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** В мире в результате исследований, направленных на поиск и изучение малых тел Солнечной системы, на сегодняшний день в Солнечной системе обнаружено более 1,3 миллиона объектов. Согласно классификации Международного астрономического союза (МАС) от 2006 года, к малым телам Солнечной системы относятся транснептуновые объекты, кометы и астероиды. Почти 99% обнаруженных и каталогизированных малых тел составляют астероиды. Астероиды являются остатками протопланетной туманности, относящимися к ранним этапам формирования Солнечной системы, и практически не изменились с течением времени. Это предоставляет возможность лучше понять прошлое и процесс формирования Солнечной системы через изучение популяции и динамики астероидов. В связи с этим стратегический план МАС на 2020-2030 годы<sup>3</sup> определяет задачи «...более глубокого изучения формирования и эволюции Солнечной системы и проведения статистического анализа ее объектов». При решении этих задач важно определить периоды вращения малых тел Солнечной системы вокруг своей оси и их орбитальные периоды, определить изменения во времени этих циклов под действием гравитационных и негравитационных сил, а также проводить мониторинг популяции и динамики астероидов.

В мире приоритет отдается исследованиям в этом направлении, включая формирование широкомасштабных оптических наблюдений на основе наблюдений на наземных астрономических обсерваториях и направление космических миссий к астероидам. В связи с этим важное значение имеют определение орбитальных и физических параметров малых тел Солнечной системы, оценка воздействия негравитационных сил на быстро вращающиеся несферические астероиды, а также определение их спинов, форм и других физических характеристик. Кроме того, актуальной задачей является изучение одиночных астероидов, систем двойных астероидов и исследование популяции и динамики генетически связанных пар астероидов, образующихся в результате вращения-разделения.

В нашей Республике проводится ряд работ, направленных на наблюдение малых тел Солнечной системы, исследование их орбитальных и физических параметров и тем самым изучение их эволюции, динамики и популяции, и в этом направлении достигнуты определенные положительные результаты. В стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы<sup>4</sup> определены важные задачи по «...экологии и охране окружающей среды» и «...созданию эффективной системы предупреждения и предотвращения чрезвычайных ситуаций». В связи с этим большое значение приобретают исследования, направленные на мониторинг Потенциально Опасными

---

<sup>3</sup> IAU Strategic Plan 2020–2030. [https://www.iau.org/static/administration/about/strategic\\_plan/strategicplan-2020-2030.pdf](https://www.iau.org/static/administration/about/strategic_plan/strategicplan-2020-2030.pdf)

<sup>4</sup> Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60 «О Стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы»

Астероидами (ПОА), которые движутся по орбитам, очень близким к орбите Земли, и представляют угрозу биологической жизни на нашей планете. Данная диссертационная работа охватывает наблюдения, проведенные в сотрудничестве с обсерваторией Майданак в рамках миссии DART (Double Asteroid Redirection Test), которая впервые испытала метод воздействия с целью планетарной защиты. Исследование также включает результаты совместных изысканий с Технологическим институтом Чикаго в Японии и Астрономическим институтом Академии наук Чешской Республики.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит реализации задач, определенных в Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-60 от 28 января 2022 года «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы», а также в Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-5032 “О мерах по повышению качества образования и совершенствованию научных исследований в области физики” от 19 марта 2021 года и других нормативно-правовых документов, связанных с данной деятельностью.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Данная научно-исследовательская работа соответствует положениям Указа №УП-6097 от 29.10.2020 года Президента Республики Узбекистан: «Об утверждении концепции развития науки до 2030 года», пункты, приведенные в главе 3 "Приоритетные направления развития науки": - «в-третьих, Подготовка высококвалифицированных научных и инженерных кадров и их ориентация на научную деятельность» и «пятое, Формирование современной информационной среды, способствующей развитию науки».

**Степень изученности проблемы.** В настоящее время изучением малых тел Солнечной системы, включая определение их орбитальных и других физических параметров, классификацией, оценкой влияния на них эффектов Ярковского и YORP (Yarkovsky–O’Keefe–Radzievskii–Paddack), а также исследованием других теоретических и практических вопросов занимаются такие известные зарубежные ученые как P. Pravec, R.P. Binzel, E. Bowell, A.W. Harris, S.J. Ostro, D.J. Scheeres, D. Nesvorny, D. Vokrouhlicky, N.A. Moskovitz, Yu. N. Krugly, V. G. Shevchenko, D. Polishook, K. Muinonen. Этими вопросами также активно занимаются ученые стран СНГ (Содружество Независимых Государств): Yu.D. Medvedev, I.E. Molotov, Yu.A. Chernetenko, V.B. Kuznetsov, A. Serebryanskiy, L.I. Shestakova и др. В Узбекистане проводятся работы, направленные на наблюдение малых тел Солнечной системы, исследование их орбитальных и физических параметров, изучение их эволюции, динамики и популяции, и в этом направлении достигнуты определенные результаты. Следует отметить, что данная исследовательская работа является первой диссертацией по изучению астероидов, выполненной в нашей стране.

В настоящее время большая часть сведений о малых телах (астероидах) Солнечной системы получена в результате оптических и радиолокационных наблюдений астероидов с наземных обсерваторий. Очень ценные данные



дали и космические миссии к малым телам Солнечной системы. Однако следует отметить, что наблюдения с наземных обсерваторий сравнительно недороги и позволяют через широкую сеть пунктов наблюдений охватить большие участки небесной сферы. Кроме того, внедрение эффективных компьютерных алгоритмов существенно повышает качество анализов астероидов (Jedicke и др., 2002; Larson, 2007; McMillan, 2007; Pravdo и др., 1999; Stokes и др., 2000; Kubica и др., 2007; Kaiser, 2004).

Исследование астероидов, являющихся остатками формирования протопланетной туманности, позволяет лучше понять историю Солнечной системы и ее эволюцию (Morbidelli и др., 2002, 2005). Изучение гравитационных и негравитационных эффектов привело к значительному прогрессу в наших знаниях о динамике астероидов (Rosemary, 2013). Это проливает свет на то, как астероиды Главного пояса достигают околоземных орбит (Боттке и др., 2002b), а также на структуру некоторых известных семейств малых тел (Боттке и др., 2006). Эффект Ярковского оказывает существенное влияние на орбиты Астероиды, Сближающиеся с Землёй (АСЗ), и эти эффекты необходимо учитывать для наиболее точного прогнозирования траекторий, включая прогнозирование и для АСЗ (Giorgini и др., 2002; Chesley, 2006; Giorgini и др., 2008; Milani и др., 2009). Опасность столкновений с околоземными астероидами (Harris, 2008) привела к их обширным исследованиям, и некоторые данные позволяют предположить, что они могут быть источником некоторых метеоритов (Burbine и др., 2002). Их способность влиять на процесс биологической эволюции на Земле (Alvarez и др., 1980; Hildebrand и др., 1991) делает эти астероиды объектом исследования в некоторых космических миссиях (Farquhar и др., 2002) и приводит к использованию методов активного воздействия на АСЗ для защиты нашей планеты (Tomas и др., 2023). Испытания, связанные с кинетическим воздействием, пока еще новы для человечества, тот факт, что последствия такого воздействия недостаточно изучены, требует тщательного развития моделирования в этой сфере.

В настоящее время считается, что малые тела Солнечной системы образуют двойные (бинарные) и генетически связанные пары астероидов, движущиеся по схожим, но отдельным орбитам, которые появились как предложил D.J. Scheeres (2007) в результате вращения-разделения.

Первые известные пары астероидов были открыты Vokrouhlicky и Nesvorny (2008) и теперь идентифицируются с использованием методов, разработанных Pravac и Vokrouhlicky (2009), D. Nesvorny (2010) и Rozek и др. (2011). Pravac и др. (2010) изучили выборку из 32 пар астероидов и обнаружили связь между частотами первичных пар астероидов и соотношением масс пар астероидов. Подробные наблюдения пар астероидов были проведены в работе Moskovitz (2012), Duddy и др. (2012, 2013), Wolters и др. (2014) и Polishook и др. (2014a). Количество обнаруженных пар астероидов пока не отражает истинной картины. Тот факт, что среди них есть объекты, появление которых не может быть полностью объяснено процессом

вращения-разделения, требует дальнейших исследований и сбора как можно большего количества статистических данных.

**Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научных исследований лаборатории «Галактической астрономии» Астрономического института АН РУз, а также в рамках научных проектов ФА-ФА-Ф026 «Поиск и наблюдения малых планет Солнечной системы, изучение их орбитальных и физических свойств» (2012–2016), ВА-ФА-Ф-2-010 «Определение пространственных и кинематических характеристик тел планетных систем на основе результатов оптических наблюдений» (2017–2020).

**Целью исследования** является исследование орбитальных и физических параметров малых тел Солнечной системы (астероидов) на основе данных Майданакской и партнерских обсерватории, а также с использованием открытых данных.

**Задачи исследования:**

Создание банк данных наблюдений астероидов на обсерватории Майданак;

Определение периодических составляющих в полученных кривых блеска;

Поиск признаков двойственности (бинарности) объектов из периодических составляющих;

Определение орбитальных и физических параметров идентифицированных или ранее известных парастероидов;

Изучение генетических пар астероидов и определение их физических и орбитальных параметров;

**Объектом исследования** являются астероиды Главного пояса Солнечной системы и астероиды, сближающиеся с Землёй.

**Предметом исследования** является анализ периодических составляющих, появляющихся на кривых блеска малых тел Солнечной системы и физических процессов, которые претерпевают изменения со временем.

**Методы исследования.** Общепринятые методы наблюдения малых тел Солнечной системы и обработки их цифровых изображений, методы фотометрических измерений на основе цифровых изображений, методы определения геометрических и физических составляющих в фотометрических временных рядах, фотометрический анализ полученных результатов данных наблюдений и методы их стандартизации.

**Достоверность результатов исследования** определяется наблюдениями малых тел Солнечной системы с применением современных апробированных методов обработки и анализа наблюдательных данных, а также сравнением с результатами, полученными на других обсерваториях.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

Были проведены наблюдения около 300 малых тел Солнечной системы и создана уникальная банк данных наблюдений;

Всего были изучены периодические составляющие на кривых блеска около 50 объектов, из них определены периоды вращения 20 объектов и впервые определены периоды вращения вокруг своей оси для 8 объектов;

Впервые обнаружено, что астероид 458732 (2011 MD5) является двойной системой, то есть имеет естественный спутник, определены орбитальные и физические параметры этой двойной системы;

Было установлено, что большая полуось орбиты естественного спутника астероида 88710 (2001 SL9) уменьшается. Это показывает, что спутник постепенно падает на астероид. С учетом этого были определены орбитальные и физические параметры этой системы;

Проведен сравнительный анализ модели и реальных процессов взаимных событий системы Didymos-Dimorphos до и после столкновения с космическим аппаратом НАСА DART.

Было подтверждено, что девять пар астероидов являются генетическими парами, и для них определены физические и орбитальные параметры;

**Практические результаты исследования** заключаются в следующем:

Полученные параметры малых тел Солнечной системы могут использоваться при изучении происхождения и эволюции Солнечной системы, популяции и динамики малых тел, а также для совершенствования теоретических моделей;

Разработанные в диссертации методы наблюдения, фотометрии и анализа могут послужить основой для изучения других малых тел Солнечной системы;

Кроме того, результаты, полученные в диссертации, могут быть включены в программы специальных университетских курсов по астрономии Солнечной системы и планетологии;

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Создана уникальная банк данных малых тел Солнечной системы на основе наблюдений, на телескопах Майданакской обсерватория;

Ценная информация об одиночных, двойных и генетических парах, полученная в результате наблюдений, является основой изучения физических явлений, происходящих в Солнечной системе;

Также научная и практическая значимость диссертации напрямую связана с полученными данными наблюдений, которые будут использованы при изучении этих и подобных объектов в будущем;

**Внедрение результатов исследования.**

Разработанные в диссертации методы анализа и измеренные параметры малых тел использовались другими авторами в исследованиях аналогичных объектов. Это подтверждают ссылки на наши публикации в следующих международных журналах, которые включены в базу данных Web of Sciences, SCOPUS и перечислены в Google Scholar:

Статья опубликованная на основе исследований генетически связанных пар астероидов: - Asteroid pairs: A complex picture. // Icarus, Volume 333, p. 429-463., 2019; (Yun Zhang и др. Nature communications 2022, J. Berthier и др. A&A 2023, Jin Beniyama и др. The Astrophysical Journal 2023, P. Fatka и др. MNRAS 2022, G. Voyatzis и др. Planetary and Space Science 2024) **82** цитирования;

Статья опубликованная на основе исследований двойных астероидов, вращающихся вокруг друг друга:- A satellite orbit drift in binary near-Earth asteroids (66391) 1999 KW4 and (88710) 2001 SL9 - Indication of the BYORP effect. // Icarus, Volume 360 p114321., 2021; (R. Terik Daly и др. Nature 2023, Cristina A. Thomas и др. Nature 2023, Karolina Dziadura и др. A&A 2023, Matija Cuk и др. The Planetary Science Journal 2021, F. Monterio и др. MNRAS 2021) **26** цитирований;

Статья опубликованная на основе исследований астероида 3200 Phaethon (1983 TB), который приближается к Земле и классифицируется как потенциально опасный: - Optical observations of NEA 3200 Phaethon (1983 TB) during the 2017 apparition.// Astronomy & Astrophysics, Volume 619, id.A123, 8 pp., 2018; (J. Hanus и др. A&A 2018, P.A. Taylor и др. Planetary and Space Science 2019, J.R. Masiero и др. The Astronomical Journal 2019, N.N. Kiselev и др. MNRAS 2022, J.N. Purdum и др. The Astrophysical Journal Letters 2021) **25** цитирований;

Общее количество ссылок на результаты полученные в рамках данной диссертации в публикациях зарубежных авторов составляет более **130**.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследований докладывались на семинарах Астрономического института АН РУз, и более 15 международных и республиканских конференциях.

**Публикация результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано 30 научных работ, из них 12 статей опубликованы в научных изданиях, рекомендованных ВАК Республики Узбекистан к опубликованию основных научных результатов диссертационных работ, а 4 – опубликованы в международных научных журналах с высоким рейтингом и импакт-фактором.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 137 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **введении** диссертации сформулированы цели и задачи работы, обоснована актуальность темы работы, новизна и достоверность результатов, отмечается научная и практическая значимость результатов исследования.

**В первой главе** кратко изложена история изучения малых тел Солнечной системы (астероидов) и современное состояние исследований. Обсуждаются механизмы, заставляющие астероиды вращаться вокруг своей оси и изменять свою скорость вращения. Кратко описана роль

гравитационных и негравитационных сил в процессах вращения и вращения-разделения в процессе образования двойных и генетически связанных пар. Описано оборудование, использованное в данной исследовательской работе и представлена статистика наблюдений, составившая основу собранной базы данных.

В рамках данной диссертационной работы основная часть наблюдательных данных малых тел Солнечной системы была получена с помощью телескопов Майданакской обсерватории в период с 2012 по 2023 годы. В наблюдениях использовались 6 телескопов разных диаметров Майданакской обсерватории, и также Самаркандской и Паркентской научно-учебных обсерваторий. К ним относятся такие телескопы, как AZT-22, Z-1000, NT-60, ST-60, GP-48 и AZT-14.

Перечисленные выше телескопы были оснащены следующими ПЗС (Прибор с Зарядовой Связью) камерами: SI 600 (SNUCAM), FLI Micro Line 09000-65, FLI IMG1001E, Andor iKon-L 936, FLI Pro Line 4710 и Bro Cam SITe005. В наблюдениях использовались в основном светофильтры BVRI типа Бесселя.

Суммарно, в 2012-2023 годах на Майданакской обсерватории, Самаркандской и Паркентской научно-учебных обсерваториях были проведены оптические наблюдения около 300 малых тел Солнечной системы. В результате наблюдений создана уникальная банк данных наблюдений малых тел Солнечной системы объемом более 10 ТБ.

**Во второй главе** представлены методы обработки и анализа данных наблюдений с учетом инструментальных ошибок и геометрических составляющих, стандартизация, оценки периодических составляющих и некоторые результаты.

Первый параграф этой главы (§2.1) посвящен обработке астроизображений и фотометрическим измерениям. При первичной обработке цифровых изображений учитывались вспомогательные изображения как bias, dark и flat. Путем проверки оптимальных значений отношения сигнал/шум при фотометрических измерениях были определены оптимальные параметры для процедуры фотометрии. После правильного выбора апертур по проведенным измерениям были получены инструментальные величины. При анализе и стандартизации инструментальных величин использовались методы «Дифференциальная фотометрия» и «Абсолютная фотометрия».

Во втором параграфе (§2.2) обсуждаются геометрические составляющие кривых блеска. Вариации результатов наблюдений за наблюдаемую ночь в основном связаны с геометрической формой астероида и вектором его вращения. Структура долговременных изменений отражает особенности расстояния и геометрии Солнце-Цель-Наблюдатель. Влияние расстояний на форму кривой блеска можно рассчитать с помощью следующего уравнения:

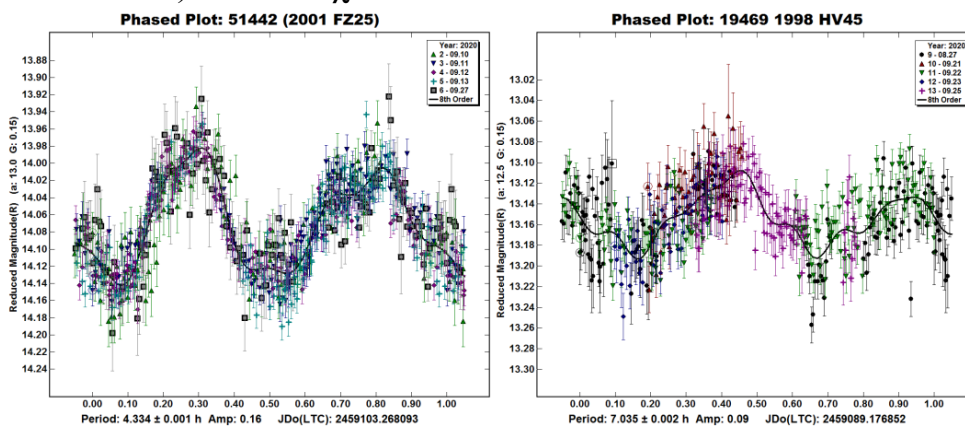
$$V(\alpha) = V - 5 \log(r * \Delta) \quad (1)$$

здесь  $V(\alpha)$  предполагаемая звездная величина астероида для угла  $\alpha$ . А  $r$  и  $\Delta$  это расстояния астероид-Солнце и астероид-Земля соответственно. Кроме того, астероиды, как и Луна, имеют фазы, и это влияние необходимо учитывать. Существует несколько различных математических решений фазовых кривых астероидов, среди которых фазовая функция для величин  $H, G$ , которая была принята Международным астрономическим союзом в 1985 году:

$$10^{-0.4V(\alpha)} = \alpha_1 \Phi_1(\alpha) + \alpha_2 \Phi_2(\alpha) \\ = 10^{-0.4H} [(1 - G)\Phi_1(\alpha) + G\Phi_2(\alpha)] \quad (2)$$

где  $\alpha$  фазовый угол, а  $V(\alpha)$  звездная величина астероида под углом  $\alpha$  без компонентов расстояния. Базовые функции  $\Phi_1, \Phi_2$  определяется тригонометрическими функциями, связанными с  $\alpha$ . Коэффициенты  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  коэффициенты определены эмпирически в результате наблюдений.

В третьем параграфе (§2.3) представлены результаты анализа, направленного на определение периодических составляющих кривых блеска. Периодические компоненты кривых блеска обусловлены периодом вращения малых тел вокруг своей оси и их естественных спутников. Известно, что оптические наблюдения с Земли представлены в виде нерегулярных и нелинейных временных рядов. Существует ряд распространенных методов поиска периодических составляющих в нелинейных временных рядах. Среди них метод периодограммы Ломба-Скаргла (LS), метод дисперсионного анализа (Analysis of variance - AOV), метод спектральной мощности (Power-spectrum - PS), метод минимизации фазовой дисперсии (phase dispersion minimization - PDM) и метод  $\chi^2$ .



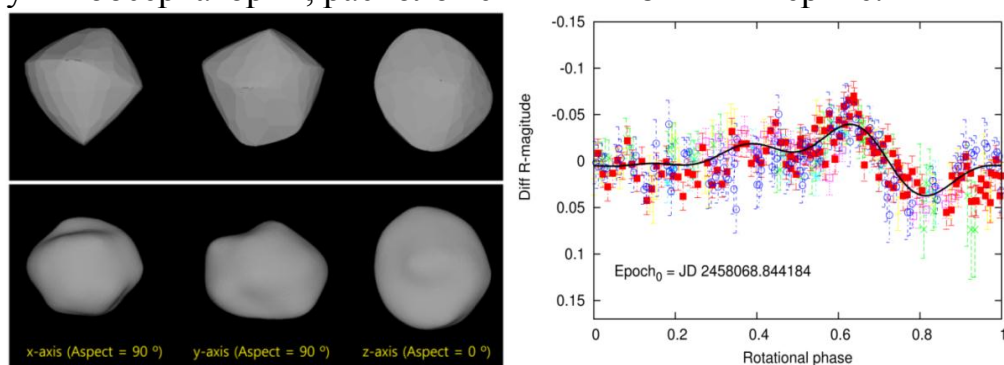
**Рисунок 1.** Составные кривые блеска 51442 (2001 FZ25) и 19469 (1998 HV45)

Мы искали периодические составляющие, используя программное обеспечение, сочетающее в себе один или несколько методов. Нами проведен анализ временных рядов с использованием собственного программного обеспечения, основанного на методе LS, а также Peranso, Period04 и MPO Caporus, которые определяют периодические составляющие кривых блеска. По результатам анализа установлено, что более 50 астероидов имеют периодические составляющие кривых блеска. Периоды вращения вокруг своих осей более чем 20 астероидов были переопределены или уточнены. Кроме того, впервые определен период вращения вокруг собственной оси

еще восьми астероидов. В качестве примера на рисунке 1 показаны фазовые кривые блеска астероидов 51442 (2001 FZ25) и 19469 (1998 HV45), периоды которых были определены впервые.

Четвертый параграф (§2.4) посвящен результатам наблюдений 3200 Phaethon (1983 TB), который приближается к Земле и классифицируется как потенциально опасный астероид. Этот объект является целью исследований миссии DESTINY<sup>+</sup>, запуск которой запланирован на 2025 год Японским институтом Космоса и Астронавтики и Японское агентство аэрокосмических исследований.

Возможность получения качественных плотных фотометрических данных по наблюдениям Phaethon стала доступна в конце 2017 года. Это было его самое близкое приближение к Земле за 40 лет. В том же 2017 году мы участвовали в фотометрической наблюдательной компании Phaethon с целью изучения свойств вращения и улучшения точности полярного направления. Наблюдения проводились с помощью телескопов Майданака и семи других обсерваторий, расположенных в Азии и Америке.



**Рисунок 2.** Формы модели LI (вверху слева) и SAGE (внизу слева) и составная кривая блеска (справа) Phaethon.

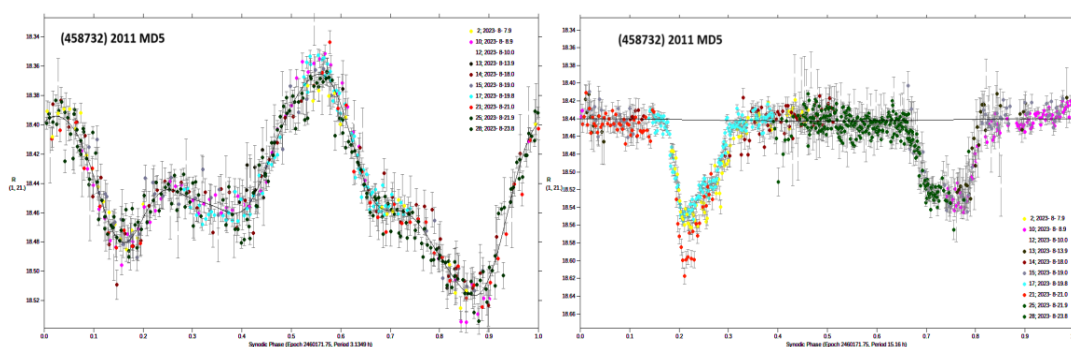
Проведя анализ набора наблюдательных данных, мы получили составную кривую блеска Phaethon, определив синодический период вращения  $3,6039 \pm 0,0004$  часа двумя независимыми методами (рис. 2, правая панель). Амплитуда кривой блеска составила  $0,095 \pm 0,035$  звездной величины. Столь маленькая амплитуда, по-видимому, обуславливается почти сферической формой астероида. Кроме того, с помощью метода LI (Lightcurve Inversion) и алгоритма SAGE (Shaping Asteroids with Genetic Evolution) мы рассчитали сидерические периоды вращения астероида Phaethon равные 3,603957 и 3,603956 часов, а также мы получили его полярную ориентацию в эклиптической системе координат ( $308^\circ$ ,  $-52^\circ$ ) и ( $322^\circ$ ,  $-40^\circ$ ) соответственно. Трехмерные модели формы Phaethon были получены обоими методами (рис. 2, левая панель). Модель формы и полярную ориентацию в эклиптической системе координат, полученные в ходе данного исследования, дадут необходимую информацию не только для дальнейших исследований Phaethon, но и для миссии DESTINY<sup>+</sup>, которую планируется отправить к астероиду в 2025 году.

**В третьей главе** представлены результаты исследований таких систем двойных астероидов, как 458732 (2011 MD5), 88710 (2001 SL9) и 65803

Didymos (1996 GT). Первая из этих систем двойных астероидов, точнее 458732 (2011 MD5), впервые открыта в рамках данной исследовательской работы. Изменения орбитальной динамики второго объекта были обнаружены вследствие естественных процессов, а изменения орбитальной динамики третьего объекта произошли из-за столкновения с космическим аппаратом DART.

В первом параграфе (§3.1) описываются наблюдения 458732 (2011 MD5) и выявление факта его двойственности. Этот околоземный астероид группы Аполлонов, наблюдался на обсерватории Майданак в общей сложности 6 ночей в августе-сентябре 2023 года. Время экспозиции составляло от 120 до 60 секунд в R-фильтре. Для улучшения качества декомпозиции кривой блеска время экспозиции было уменьшено до 6 секунд, чтобы получить серию плотных точек в сентябре.

В ходе анализа выявлена компонента с периодичностью более 3 часов во временном ряду. Его период вращения вокруг своей оси был определен впервые и составил  $3,1350 \pm 0,0006$  часа (левая часть рисунка 3). Амплитуда изменения блеска астероида по результатам наблюдений была равной 0,15 звездной величины в фильтре R. Это означает, что это быстро вращающееся тело, имеющее форму, близкую к сфероиду.



**Рисунок 3.** Составная кривая блеска (слева) и фазовая кривая бинарной системы (справа) 458732 (2011 MD5)

Анализ показал, что в общей кривой блеска есть еще один компонент с большим периодом. Когда этот компонент был извлечен и проанализирован с использованием стандартных методов декомпозиции (правая часть рис. 3), выяснилось, что астероид 458732 (2011 MD5) представляет собой двойной астероид. Таким образом, нами впервые было установлено, что астероид 458732 (2011 MD5) имеет собственную «Луну». Эта двойная система имеет затменно-двойную видимую геометрию, и обнаружено, что ее спутник обращается вокруг астероида каждые  $15,16 \pm 0,02$  часа. Орбитальное движение спутника имеет различную взаимную глубину событий: Затмение -  $0,09^m$  и оккультации -  $0,16^m$ , а отношение диаметров ( $D_2/D_1$ ) составляет  $0,29 \pm 0,02$ .

Во втором параграфе (§3.2) описаны наблюдения и орбитальная динамика околоземного двойного астероида 88710 (2001 SL9). Для анализа использовались в общей сложности данные наблюдений за 40 ночей с 2001



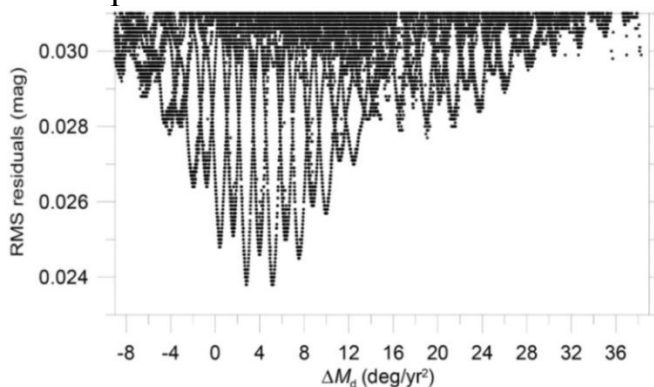
по 2015 год, около 5 оппозиций. Наблюдения проводились в разные годы в 8 обсерваториях мира, таких как Майданак, La Silla, U. Hawai, Ondrejov, Abastumani, Lowell, Simeiz и Palmer Divide. Данная выборка данных является выборкой с самым большим охватом набора фотометрических данных для двойного астероида 88710 (2001 SL9) и дает уникальную возможность изучить орбитальную эволюцию компонент двойного астероида. Данные были разделены на составляющие: первичные (короткопериодические) и вторичные (долгопериодические) путем подгонки двухпериодного ряда Фурье к точкам данных вне взаимных событий. Для численного моделирования использовались долгопериодические компоненты, включающие взаимные события.

Мы смоделировали двойную систему астероида (88710) 2001 SL9, используя методику Scheirich и Pravec (2009). Они вращаются вокруг друг друга по орбите Кеплера с апсидальной прецессией, допуская квадратичный дрейф средней аномалии. Квадратичный дрейф средней аномалии  $\Delta M_d$ , устанавливается как независимый параметр. В этом случае изменяющаяся во времени средняя аномалия равна:

$$M(t) = M(t_0) + n(t - t_0) + \Delta M_d(t - t_0)^2; \quad \Delta M_d = \frac{1}{2} \dot{n}; \quad (3)$$

где  $n$  - среднее движение,  $t$  - время, а  $t^0$  - нулевая эпоха.  $\Delta M_d$  для (88710) SL9 2001 проверено в диапазоне от -9 до +39 градусов/год<sup>2</sup>. Шаги в  $\Delta M_d$  выбраны равными 0,01 градуса/год<sup>2</sup>. График остатков среднеквадратического отклонения (RMS) в зависимости от  $\Delta M_d$  показан на рисунке 4.

Пять лучших минимальных среднеквадратичных остатков, полученных для  $\Delta M_d$ , составили 0,0238, 0,0238, 0,0245, 0,0246 и 0,0248 соответственно по величине. Первые два решения удовлетворительно соответствуют данным, одно из которых является истинным решением для параметров данной двойной системы астероида. Однако на основании имеющихся данных наблюдений мы не можем вынести суждение в пользу любого из этих двух решений. Остальные три решения с высокими среднеквадратичными невязками существенно плохо соответствуют данным наблюдений и явно далеки от реалистичных решений.



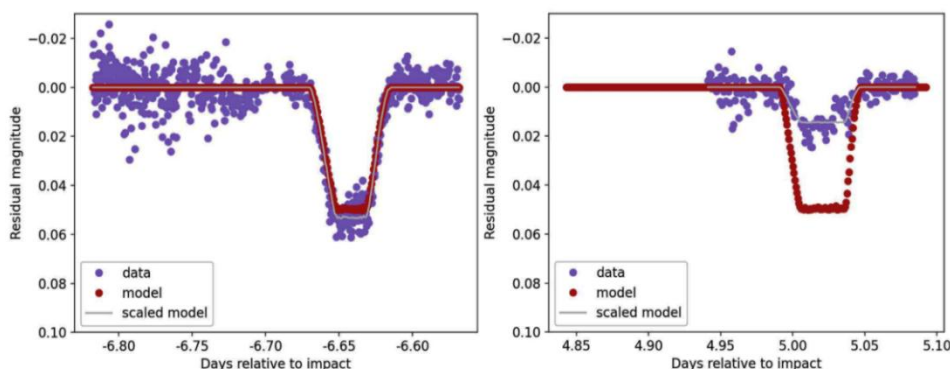
**Рисунок 4.** График зависимости RMS остатков и  $\Delta M_d$ .

Таким образом, мы изучили долговременную эволюцию взаимной орбиты двойной системы, используя данные наших фотометрических наблюдений (88710) 2001 SL9, выполненных за почти 14 лет в пяти

оппозициях. Было обнаружено, что полярная ориентация взаимных орбит  $(L,V)=(302^\circ, -73^\circ)$ , а сама орбита близка к круговой ( $e<0,07$ ). Мы обнаружили, что большая полуось его взаимной орбиты (около  $\sim 1,6$  км) сжимается со скоростью  $-2,8\pm 0,2$  или  $-5,1\pm 0,2$  см/год ( $2,8$  и  $5,2$  градуса/год<sup>2</sup> для  $\Delta M_d$  соответственно).

В третьем (§3.3) и четвертом (§3.4) параграфах представлены наблюдения и анализ воздействия космической миссии DART (Double Asteroid Redirection Test) на двойную систему астероидов 65803 Didymos (1996 GT). 26 сентября 2022 года космическая миссия DART произвела столкновение с Dimorphos, который является естественным спутником околоземного бинарного астероида (65803) Didymos. Это изменило орбитальный период Dimorphos на 33 минуты, продемонстрировав эффективность кинетического воздействия в защите нашей планеты. До столкновения период обращения Didymos составлял  $=2,2600\pm 0,0001$  часа, а период обращения Dimorphos вокруг Didymos составлял  $=11,921481\pm 0,000016$  часа. После столкновения новый орбитальный период Dimorphos составил  $=11,372\pm 0,017$  часа.

В сборе данных участвовали Майданак и 27 других обсерваторий мира, которые позволили в рамках данной кампании получить кривую блеска DART с плотными рядами данных наблюдений. Это означает, что большой набор данных из 224 кривых блеска, полученных с июля 2022 года по февраль 2023 года, содержат сотни взаимных событий. Используемые телескопы имели диаметр от 0,5 до 6,5 метров и были оснащены различными ПЗС камерами. Имея данные почти за 8 месяцев, включая результаты столкновений, мы оценили эволюцию взаимных событий по отношению к моделям. Подробности фотометрической модели, использованной для этого анализа, приведены в работе Naidu и др. (2023). Эта модель была разработана в первую очередь для облегчения определения времени взаимных событий по фрагментированным (прерывным) кривым блескам. В модели использовались вращательно-симметричные эллипсоидные формы для Dimorphos и Didymos на основе объемов, определенных Daly и др. (2023). Эта модель дает реалистичные прогнозы времени и морфологии (формы, глубины) взаимных событий.



**Рисунок 5.** Сравнение данных наблюдений до столкновения (слева) и после столкновения (справа) с результатами моделирования.

На рисунке 5 показаны взаимные события в кривых блесках до и после столкновения по сравнению с моделью. В таких случаях модели хорошо отражают время и качество событий. Однако модели взаимных событий Naidu и др. (2023) слишком глубоки. В данных после столкновения модели завышают глубину взаимных событий, и эта разница может быть связана с эффектами остаточных выбросов в системе.

В **четвертой главе** представлены исследования генетически связанных пар астероидов, движущихся по очень близким гелиоцентрическим орбитам друг к другу. В первом (§4.1) и втором (§4.2) параграфах представлены соответственно идентификация пар астероидов, механизмы отбора для исследования, результаты наблюдений и анализа каждой пары.

Мы идентифицировали пары-кандидаты астероидов, анализируя распределение расстояний астероидов в пятимерном пространстве средних орбитальных элементов ( $a, e, i, \bar{\omega}, \Omega$ ) с использованием метода Pravesc и Vokrouhlicky (2009). Расстояние между орбитами двух астероидов ( $d_{mean}$ ) рассчитывается по следующей положительно определенной квадратичной форме:

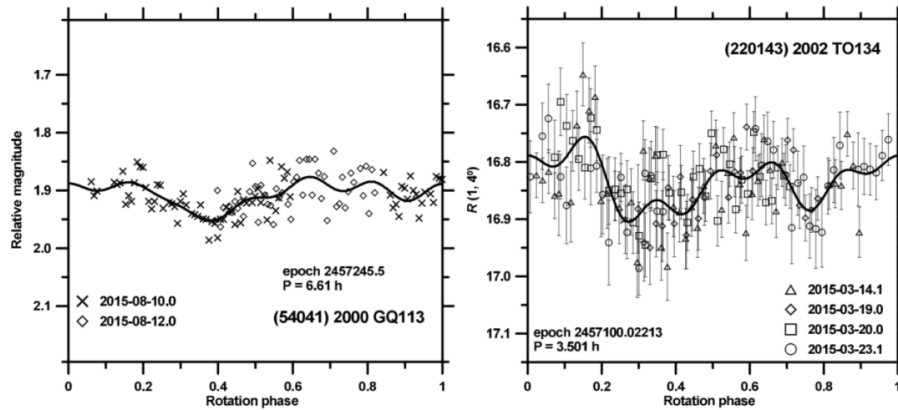
$$\left(\frac{d_{mean}}{na}\right)^2 = k_a \left(\frac{\delta a}{a}\right)^2 + k_e (\delta e)^2 + k_i (\delta \sin i)^2 + k_\Omega (\delta \Omega)^2 + k_{\bar{\omega}} (\delta \bar{\omega})^2 \quad (4)$$

здесь  $n$  и  $a$  среднее движение и большая полуось одного из двух астероидов, а также  $(\delta a, \delta e, \delta \sin i, \delta \bar{\omega}, \delta \Omega)$  вектор разделения их средних орбитальных элементов. Следуя Zappala и др. (1990), Pravesc и Vokrouhlicky (2009), мы использовали значения  $k_a = 5/4$ ,  $k_i = 2$ , и  $k_{\bar{\omega}} = k_\Omega = 10^{-4}$ . Расстояние  $d_{mean}$  между орбитами двух астероидов является грубой мерой относительных скоростей астероидов. Для большинства пар астероидов она колеблется от нескольких  $10^{-1}$  до нескольких  $10^1$  м/с.

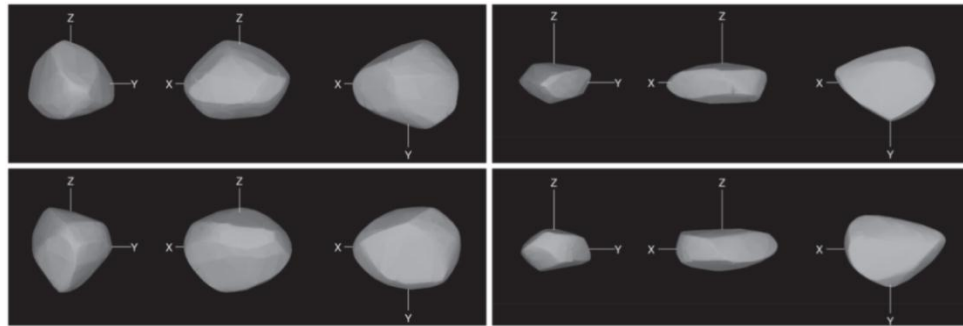
Мы рассмотрели 93 пары астероидов. Учитывая наблюдательные возможности Майданакской обсерватории и основываясь на данных наблюдений обсерваторий-партнеров, нами для наблюдений было отобрано 9 пар (табл. 1). Нами проведены фотометрические наблюдения выбранных нами 9 пар астероидов и собраны фотометрические данные, позволившие построить их кривые блеска. По данным наблюдений получены первичный и вторичный периоды вращения (P1, P2) и средние амплитуды по полученным кривым блескам (A1, A2). В качестве примера на рис. 6 показаны составные кривые блеска, полученные для обоих членов одной из пар.

Для большинства первичных и некоторых вторичных объектов мы также получили их точные абсолютные звездные величины. Исходя из этого, мы рассчитали их значения  $\Delta H = (H_2 - H_1)$ . Отношение масс  $q$  пары астероидов оценивалось по величине  $\Delta H$  по формуле  $q = 10^{-0.6\Delta H}$ . Кроме того, для большинства членов пар были получены цветовые показатели (V-R). При наличии достаточного количества данных были получены полярные решения и CONVEX модели формы членов некоторых пар. В качестве примера на рисунке 7 показаны модели формы, полученные для обоих членов одной из пар. В нем CONVEX модели формы, соответствующие (2110) Moore-Sitterly, приведены на верхней левой панели для полярных решений (L1, B1) = (91°, -

75°) и на нижней левой панели для  $(L1, B1)=(270^\circ, -77^\circ)$ . А CONVEX модели формы, соответствующие (44612) 1999 RP27, приведены на правой верхней панели для полярных решений  $(L2, B2)=(8^\circ, -73^\circ)$  и на правой нижней панели для  $(L2, B2)=(193^\circ, -69^\circ)$ .



**Рисунок 6.** Составные кривые блески (54041) 2000 GQ113 (слева) и (220143) 2002 TO134 (справа).



**Рисунок 7.** Две CONVEX модели формы для (2110) Moore-Sitterly (слева) и (44612) 1999 RP27 (справа).

Для подтверждения членства в паре мы создали набор геометрических клонов (по 1000 клонов на каждый астероид). Эффект Ярковского влияет на каждый клон по-разному. Эффект Ярковского представлен ложным поперечным ускорением, действующим на клон с величиной, которая дает многолетнее изменение большой полуоси  $\dot{a}_{Yark}$  (Farnocchia и др., 2013). Оно выбирается из диапазона  $\langle -\dot{a}_{max}, \dot{a}_{max} \rangle$ , где  $\dot{a}_{max}$  рассчитывается исходя из размера астероида (см. Vokrouhlicky, 1999). Целью нашей обратной орбитальной интеграции было нахождение ближайших низкоскоростных столкновений между клонами членов пары.

Для численного интегрирования мы использовали симплектический интегратор Wisdom-HolmanWHFast (Rein и Tamayo, 2015) из пакета REBOUND (Rein и Liu, 2012). Мы взяли эффект Yarkovskiy от Nesvornyy и Vokrouhlicky (2006) и добавили его в код. Также, нами учтено влияние гравитации Солнца, 8 больших планет, двух карликовых планет Плутона и Цереры, а также двух крупных астероидов Весты и Паллады. В наших расчетах мы выбрали временной шаг в 6 часов, что позволяло нам обнаруживать столкновения в наших симуляциях. Каждому геометрическому клону присваивается случайное значение  $\dot{a}_{Yark}$  из диапазона  $\langle -\dot{a}_{max}, \dot{a}_{max} \rangle$ . Для каждой пары мы рассчитали время между их клонами до столкновения -

время  $T_{sep}$  после отделения вторичного от первичного. Список возрастов пар, оцененный с помощью обратного интегрирования гелиоцентрических орбит выбранных и наблюдаемых пар, приведен в таблице 1.

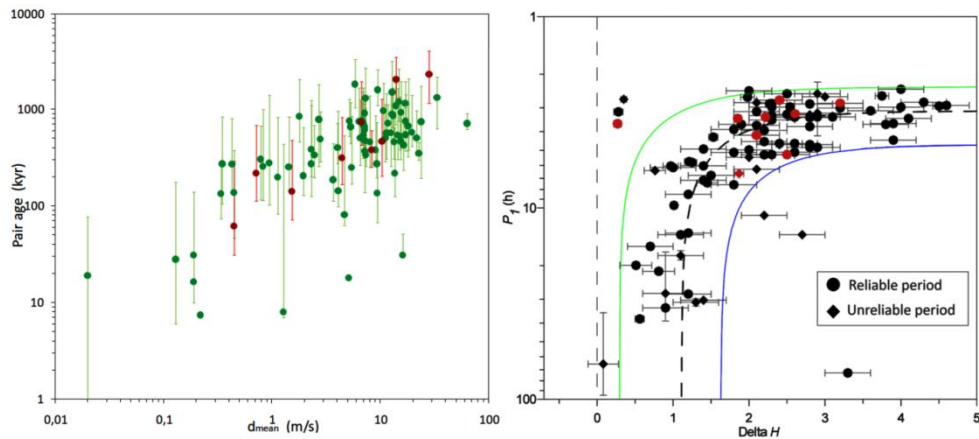
**Таблица 1.** Межорбитальные расстояния и рассчитанный возраст пар.

№	Первичный	вторичный	$d_{mean}$ (м/с)	Возраст (тыс. лет)
1	(2110)	(44612)	14.08	$2042^{+1413}_{-896}$
2	(17198)	(229056)	4.44	$313^{+507}_{-146}$
3	(42946)	(165548)	6.68	$739^{+1189}_{-314}$
4	(54041)	(220143)	0.72	$217^{+467}_{-105}$
5	(60677)	(142131)	1.54	$141^{+338}_{-69}$
6	(13284)	(154828)	28.29	$2304^{+1749}_{-1154}$
7	(70511)	(462176)	8.32	$380^{+222}_{-125}$
8	(88259)	(337181)	0.45	$62^{+227}_{-31}$
9	(105247)	2009 SZ67	10.40	$466^{+802}_{-261}$

Оценочный возраст пар варьируется от 60 тыс. до 2 млн лет. Существует взаимная корреляция между рассчитанными номинальными возрастaми пар  $T_{sep}$  и средним расстоянием  $d_{mean}$  в пространстве элементов орбиты членов пары. На левой панели рис. 8 возраст и суммарное орбитальное расстояние между 89 парами астероидов, изученными нами (красные точки на графике) и другими авторами (зеленые точки на графике), взаимно коррелируют. График показывает, что между этими двумя величинами существует корреляция. Степенная функция, которая лучше всего соответствует полученным данным:

$$d_{mean} \left( \frac{m}{s} \right) = \left( \frac{T_{sep}}{160 \text{ kyr}} \right)^{1.87} \quad (5)$$

Хотя эмпирические и различные степени орбитальных возмущений и неопределенности влияют на оценку возраста некоторых пар астероидов, такое соотношение фактически справедливо для пар астероидов, образовавшихся на очень малых орбитальных расстояниях. Pravos и др. (2010) обнаружили корреляцию между частотами вращения пар астероидов и соотношением масс пар астероидов. Это называется «корреляционная диаграмма (P1-q)» Здесь P1-период вращения наибольшей из пар, а q-взаимное отношение масс пар. Эта тенденция была обнаружена путем изучения параметров 32 пар астероидов. Мы обнаружили, что 8 из 9 наблюдаемых пар астероидов соответствуют тенденции (P1-q). Лишь параметры пары (60677) 2000 GO18 и (142131) 2002 RV11 отклоняются от тренда. Это кажется несовместимым с теорией образования пар с помощью вращения-разделения. С целью увеличения покрытия для всех 93 подробно изученных на данный момент пар астероидов на рисунке 8 (правая панель) приведена корреляционной диаграмме (P1-q). На рисунке отношение масс (q) выражено как разность абсолютных звездных величин ( $\Delta H$ ), а пары, которые мы изучали по наблюдениям обсерватории Майданак, показаны красным цветом. Из этого мы видим, что 86 из 93 пар астероидов соответствуют основному отношению P1-q.



**Рисунок 8.** Корреляция между возрастом пары ( $T_{sep}$ ) и расстоянием ( $d_{mean}$ ) (слева), периодами вращения ( $P_1$ ) и разницей абсолютных звездных величин ( $\Delta H$ ) пар астероидов (справа).

На рисунке 8 кругами обозначены пары, у которых достоверно определены периоды ( $P_1$ ). Ромбиками обозначены пары, у которых периоды первичных имеют неопределенности из-за количества наблюдаемых максимумов/минимумов (бугорки) на кривой блеска за один оборот и соответственно периоды определены с неточностью 1,5 фактора. Черная пунктирная линия означает номинальную связь между периодом первичной и отношением масс, рассчитанное на основе теории образования пар астероидов путем вращения-деления. Зеленая и синяя кривые линии представляют собой теоретические пределы основной частоты вращения, и они полученные из работы Pravos и др. (2010, 2018). Этот набор параметров можно считать лучшим представлением параметров пар.

Примечательно, что полученные нами кривые блески показали, что эти объекты вращаются только вокруг одной основной оси. Никаких вращающихся объектов в неосновных осях также не обнаружено. Это еще раз подтверждает, что изучаемые объекты в ближайшее время не сталкивались и что генетически связанные пары образовались только путем вращения-разделения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе исследований, проведенных в диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) «**Исследование орбитальных и физических параметров малых тел Солнечной системы**», получены следующие основные результаты:

1. В период с 2012 по 2023 гг. Майданакской обсерватории АИ АН РУз были проведены наблюдения около 300 объектов и на этой основе создана уникальная банк данных наблюдений малых тел Солнечной системы;
2. Усовершенствованы методы обработки цифровых изображений, проведения фотометрических измерений с учетом геометрических и инструментальных составляющих, созданы конвейерные программы «pipeline» для этих целей;
3. Выявлены периодические компоненты в кривых блесков около 50 объектов, из них периоды вращения 20 объектов переопределены, а периоды вращения вокруг своей оси 8 астероидов определены впервые;
4. По наблюдательных данных 3200 Phaethon (1983 TB) определено полярные направления вращения в эклиптической системе координат ( $308^\circ$ ,  $-52^\circ$ ) и ( $322^\circ$ ,  $-40^\circ$ ) с помощью двух независимых методов - метода LI и алгоритма SAGE. Оба метода позволили получить трехмерную модель астероида. Новая модель формы и данные полярной ориентации, полученные в этом исследовании, предоставят важную информацию для предлагаемой космической миссии DESTINY+ к астероиду;
5. Доказано, что астероид 458732 (2011 MD5) является двойной системой, а точнее, что у нее есть естественный спутник, определены орбитальные и физические параметры этой двойной системы. В частности, установлено, что период вращения астероида вокруг собственной оси составляет  $3,1350 \pm 0,0006$  часа, а орбитальный период его спутника  $15,16 \pm 0,02$  часов;
6. Рассчитано, что большая полуось естественного спутника астероида 88710 (2001 SL9) уменьшается со скоростью в интервале 2,8–5,1 см/год, что указывает на падение спутника на «материнский» астероид. Также определены орбитальные и физические параметры, связанные с этой двойной системой;
7. Обнаружено, что предложенные модели системы Dimorphos-Didymos не соответствовали данным, полученным в результате реальных наблюдений после столкновения с космическим аппаратом НАСА DART (Double Asteroid Redirection Test). А именно, изменение глубины затмения астероида спутником оказалось меньше, чем прогнозировалось моделью;
8. Подтверждена генетическая связь девяти пар астероидов, определены их орбитальные и физические параметры. Изучена корреляция между возрастом пар и расстоянием членов пар в пространстве средних орбитальных элементов, а также определено их положение на диаграмме зависимости между периодом вращения ( $P_1$ ) (большого из двух) и соотношением их взаимных масс;

**SCIENTIFIC COUNCIL PhD.02/20.12.2019.FM.15.01 ON AWARD OF  
SCIENTIFIC DEGREE AT THE ASTRONOMICAL INSTITUTE**

---

**ASTRONOMICAL INSTITUTE**

**ERGASHEV KAMOLIDDIN ESHTURSUNOVICH**

**STUDY OF ORBITAL AND PHYSICAL PARAMETERS OF THE  
SOLAR SYSTEM SMALL BODIES**

**01.03.01 – Astronomy**

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD) ON  
PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

**Tashkent – 2024**



**The theme of the dissertation of the doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered by the Supreme Attestation Commission at the ministry of higher education, science and innovations of the Republic of Uzbekistan under B2024.2.PhD/FMxxx.**

The doctoral (PhD) dissertation was carried out at Astronomical Institute.

The abstract of the dissertation was posted in three (Uzbek, English, Russian (resume)) languages on the website of the Scientific Council ([www.astrin.uz](http://www.astrin.uz)) and on the website of “Ziyonet” informational and educational portal ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Supervisors:**

**Ehgamberdiev Shuhrat Abdumannapovich,**  
Doctor of physical and mathematical sciences, Acad.

**Official opponents:**

**Yuldoshev Qudratillo Khabibullaevich,**  
PhD, Ulugh Beg Astronomical Institute (UBAI)

**Akhunov Talat Axmatovich,**  
Doctor of physical and mathematical sciences, NUU

**Leading organization:**

**Fesenkov Astrophysical Institute, Kazakhstan**

The defence of the dissertation will be held on “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024, at the meeting of the Scientific Council No. PhD.02/20.12.2019.FM.15.01 at the Astronomical Institute (Address: UBAI, 33 Astronomicheskaya street, 100052, Tashkent city. Phone: (+99871) 235-81-02; Fax: (+99871) 234-48-67; e-mail: [info@astrin.uz](mailto:info@astrin.uz))

The doctoral (PhD) dissertation can be looked through in the Information Resource Center of Astronomical Institute (registered under No. \_\_\_\_\_). (Address: 33 Astronomicheskaya street, 100052, Tashkent city. Phone: (+99871) 235-81-02; Fax: (+99871) 234-48-67).

The abstract of dissertation was distributed on “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024.  
(Registry record No. \_\_\_\_\_ dated “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024).

**D.Sh. Fazilova**

Deputy Chairman of the Scientific Council  
on Award of Scientific Degrees, D.Ph.-M.S., professor

**I.A. Ibragimov**

Scientific Secretary of the Scientific Council  
on Award of Scientific Degrees, PhD

**A.B. Abdikamalov**

Chairman of the Scientific Seminar of the Scientific  
Council on Award of Scientific Degrees, D.Ph.-M.S.

## INTRODUCTION (Abstract of the dissertation of the Doctor of Philosophy (PhD))

**The aim of the research** is to investigate the orbital and physical parameters of small bodies (asteroids) in the Solar System using data from the Maidanak Observatory and partner observatories, as well as other open sources..

**The tasks of the research:**

To create a database of observational data on small bodies in the Solar System from the Maidanak Observatory;

To identify periodic components within the obtained light curves;

To search for binary indicators among objects based on the periodic components;

To determine the orbital and physical parameters of identified or previously known binaries;

To study the genetically related asteroid pairs and determine their relevant physical and orbital parameters;

**The object of the research** are the Main-belt asteroids and near-Earth asteroids of the Solar System.

**The subject of the research** is the study of physical processes in small bodies of the Solar System, manifested through periodic components in their light curves and their variations over time.

**The methods of the research.** Observation methods for small bodies in the Solar System, standard methods for processing digital images, photometric measurement techniques using digital images, methods for identifying geometric and physical components in photometric time series, photometric analysis of the identified data, standardization of the obtained results.

**The scientific novelty of the research** are as follows:

Observations of nearly 300 small bodies in the Solar System have been conducted, resulting in the creation of a unique data bank;

Periodic components in the light curves of approximately 50 objects have been studied. The rotation periods of 20 objects around their axes have been re-measured and refined, while the rotation periods of 8 objects have been determined for the first time;

The binary nature of 458732 (2011 MD5), indicating the presence of a natural satellite, has been discovered, and several orbital and physical parameters of this binary system have been determined;

It has been found that the natural satellite of 88710 (2001 SL9) is gradually spiraling inward, indicating an impending collision, and several orbital and physical parameters of this system have been determined;

Proposed models for the Didymos-Dimorphos system, which was impacted by a spacecraft in NASA's DART mission, have been compared with real observational data from both pre- and post-collision events;

Nine genetically related asteroid pairs have been confirmed as true genetic pairs, and several physical and orbital parameters relevant to these pairs have been determined;

**Practical results of the research** are as follows

The determined parameters of small bodies in the Solar System will be utilized to study and refine theoretical models of the origin and evolution of the Solar System, as well as the population and dynamics of small bodies;

The developed and applied methods for observation, photometry, and analysis will serve as a foundation for studying other small bodies in the Solar System;

Additionally, the results obtained in the dissertation can be incorporated into the curriculum of specialized courses on Solar System astronomy and planetary science at universities;

**The reliability of the research results** is substantiated by the application of modern, validated methods for observing, processing, and analyzing data on small bodies in the Solar System, as well as by comparison with results obtained from other observational sites worldwide.

**Scientific and practical significance of the research results.**

A unique database of small bodies in the Solar System has been created based on observations conducted with the telescopes at the Maidanak Observatory;

Valuable data obtained from the observations of single, binary, and genetic pairs will serve as a foundation for studying the physical phenomena occurring in the Solar System;

The scientific and practical importance of the dissertation is directly related to the observational data obtained, which will be used in future studies of similar objects;

**Implementation of the research results.** The analysis methods developed and presented in the dissertation have been used by other researchers in the study of similar objects. This is confirmed by references to our publications in the following international journals included in the Web of Science, SCOPUS databases, and listed in Google Scholar:

Asteroid pairs: A complex picture. // *Icarus*, Volume 333, p. 429-463., 2019. - Cited **82**;

A satellite orbit drift in binary near-Earth asteroids (66391) 1999 KW4 and (88710) 2001 SL9 - Indication of the BYORP effect. // *Icarus*, Volume 360 p114321., 2021. - Cited **26**;

Optical observations of NEA 3200 Phaethon (1983 TB) during the 2017 apparition. // *Astronomy & Astrophysics*, Volume 619, id.A123, 8 pp., 2018. - Cited **25**;

The total number of references to the results of the conducted work in publications by foreign authors exceeds 130.

**Testing of the research results.** The main results of the dissertation have been reported and discussed more than 15 international and republican scientific and practical conferences.

**Publication of the research results.**

On the theme of the dissertation, 12 scientific papers have been published, including 4 scientific articles in high-ranking international scientific journals.

**Volume and structure of the dissertation:** The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion and a bibliography. The volume of the dissertation is 137 pages.

**E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I bo'lim (I часть; part I)**

1. **К.Э. Эргашев**, О.А. Бурхонов, Ш.А. Эгамбердиев. “*Результаты оптических наблюдений астероидов (3076) Garber и (4527) Schoenberg на Майданакской обсерватории*” // ДАН, №1, стр.33-35, 2014; (01.00.00 №7).
2. **К.Е. Ergashev**, Sh.A. Ehgamberdiev, O.A. Burkhonov, Fumi Yoshida. “*Rotation period of asteroid 4727 Ravel*”. Minor Planet Bulletin, v.41. 79. 2014; (01.00.00, №14).
3. О.А. Бурхонов, Ш.А.Эгамбердиев, **К.Э. Эргашев**. “*Результаты наблюдений астероида (334) Chicago на Самаркандской и Майданакской обсерваториях*” // ДАН, №3, стр.39-41, 2013.; (01.00.00 №7).
4. О.А. Burkhonov, Sh.A. Ehgamberdiev, **К.Е. Ergashev**, FumiYoshida. “*Period Determination for 4527 Schoenberg*” // Minor Planet Bulletin, v.40-4. 190. 2013; (01.00.00, №14).
5. Kim M.-J., Lee H.-J., Lee S.-M., Kim D.-H., Yoshida F., Bartczak P., Dudzinski G., Park J., Choi Y.-J., Moon H.-K., Yim H.-S., Choi J., Choi E.-J., Yoon J.-N., Serebryanskiy A., Krugov M., Reva I., **Ergashev K. E.**, Burkhonov O., Ehgamberdiev S. A., Turayev Y., Lin Z.-Y., Arai T., Ohtsuka K., Ito T., Urakawa S., Ishiguro M. “*Optical observations of NEA 3200 Phaethon (1983 TB) during the 2017 apparition*” // Astronomy & Astrophysics, Volume 619, id.A123, 8 pp., 2018; (№1. Web of Science IF=5.6).
6. **К. Е. Ergashev**, Sh. A. Ehgamberdiyev, O. A. Burkhonov, Y. Sh. Turayev, F. Yoshida. “*Rotation period determination of (5889) Mickiewicz and (13063) Purifoy asteroids*” // The Minor Planet Bulletin, Vol. 46, No. 3, pp. 229-230, 2019; (01.00.00, №14).
7. Praveca P., Fatkaa P., Vokrouhlicky D., Scheirich P., Durech J., Scheeres D.J., Kusnirak P., Hornoch K., Galad A., Pray D.P., KruglyYu.N., Burkhonov O., Ehgamberdiev Sh.A., Pollock J., Moskovitz N., Thirouin A., Ortiz J.L., Morales N., Husarik M., InasaridzeR.Ya., Oey J., Polishook D., Hanus J., Kucakova H., Vrastil J., Vilagi J., Gajdos S., Kornos L., Veres P., Gaftonyuk N.M., Hromakina T., Sergeev A.V., Slyusarev I.G., Ayvazian V.R., Cooney W.R., Gross J., Terrell D., Colas F., Vachier F., Slivan S., Skiff B., Marchis F., **Ergashev K.E.**, Kim D.-H., Aznar A., Serra-Ricart M., Behrend R., Roy R., Manzini F., Molotov I.E. “*Asteroid pairs: A complex picture*” ICARUS, Volume 333, p. 429-463., 2019; (№1. Web of Science IF=3.4).
8. **Ergashev K.E.**, To'rayev Y.Sh., B.Sh. Jo'rayev, A.Q. Ajabov. “*Maydanak observatoriyasida (5889) Mickiewiczva (13063) Purifoy asteroidlarining*

- kuzatuvlari tahlili*” SamDU Ilmiy Axborotnomasi. 2019., 5-son(117), 166-169 b., 2019; (01.00.00 №2).
9. Scheirich P., Pravec P., Kusnirak P., Hornoch K., McMahon J., Scheeres D.J., Capek D., Pray D.P., Kucakova H., Galad A., Vrstil J., Krugly Yu N., Moskovitz N., Avner L.D., Skiff B., McMillan R.S., Larsen J.A., Brucker M.J., Tubbiolo A.F., Cooney W.R., Gross J., Terrell D., Burkxonov O., **Ergashev K.E.**, Ehgamberdiev Sh.A., Fatka P., Durkee R., Schunova E.L., Inasaridze R.Ya., Ayvazian V.R., Kapanadze G., Gaftonyuk N.M., Sanchez J.A., Reddy V., McGraw L., Kelley M.S., Molotov I.E. *A satellite orbit drift in binary near-Earth asteroids (66391) 1999 KW4 and (88710) 2001 SL9 - Indication of the BYORP effect*. ICARUS, Volume 360. p114321, 2021; (№1. Web of Science IF=3.4).
  10. **K.E. Ergashev**, O.A. Burkxonov, Sh.A. Ehgamberdiev, S.M. Abduraimov. “Rotation period determination for asteroids (19469) 1998 HV45 and (51442) 2001 FZ25”. MPBull., Volume 49, Number 3, p. 192-193, 2022; (01.00.00, №14).
  11. **K.E. Ergashev**, R.I. Tojiyev, B.Sh. Jurayev, A.M. Shaymanov, T.I. Boyqobilov. *(16447) Vauban asteroidining optik kuzatuvlari va faza funksiyasi tahlili*. SamDU Ilmiy Axborotnomasi. 2022-yil, 3-son (133), b 164-170; (01.00.00 №2).
  12. Moskovitz N., Thomas C., Pravec P., Lister T., Polakis T., Osip D., Kareta T., Rozek A., Chesley S.R., Naidu S.P., Scheirich P., Ryan W., Ryan E., Skiff B., Snodgrass C., Knight M.M., Rivkin A.S., Chabot N.L., Ayvazian V., Belskaya I., Benkhaldoun Z., Bertesteanu D.N., Bonavita M., Bressi T.H., Brucker M.J., Burgdorf M.J., Burkxonov O., Burt B., Contreras C., Chatelain J., Choi Y.-J., Daily M., De Leon K., **Ergashev K.**, Farnham T., Fatka P., Ferrais M., Geier S., Gomez E., Greenstreet S., Groller H., Hergenrother C., Holt C., Hornoch K., Husarik M., Inasaridze R., Jehin E., Khalouei E., Eluo J.-B.K., Kim M.-J, Krugly Y., Kucakova H., Kusnirak P., Larsen J.A., Lee H.-J., Lejoly C., Licandro J., Longa-Pena P., Mastaler R.A., McCully C., Moon H.-K., Morrell N., Nath A., Oszkiewicz D., Parrott D., Phillips L., Popescu M.M., Pray D., Prodan G.P., Rabus M., Read M.T., Reva I., Roark V., Santana-Ros T., Scotti J.V., Tatara Y., Thirouin A., Tholen D., Troianskyi V., Tubbiolo A.F., Villa K. *Photometry of the Didymos System across the DART Impact Apparition*. The Planetary Science Journal, 5:35 (28pp), 2024; (№1. Web of Science IF=3.4).

## II bo‘lim (II часть; part II)

13. **K.E. Ergashev**, O.A. Burxonov, R.I. Tojiyev. *Asteroid juftliklarining yosh va o‘zaro orbital masofalari bo‘yicha taqsimoti*. “Uchinchi Renessans yosh olimlari: zamonaviy vazifalar, innovatsiya va istikbol” mavzusidagi Xalqaro ilmiy – amaliy anjuman, 2024 yil 3 may, Toshkent, 286-289 B., 2024;
14. **K.E. Ergashev**, R.I. Tojiyev, O.A. Burxonov. *Asteroid juftliklari birlamchilarining aylanish davri va juftliklarning o‘zaro massa nisbatlari*

- taqsimoti*. “Uchinchi Renessans yosh olimlari: zamonaviy vazifalar, innovatsiya va istikbol” mavzusidagi Xalqaro ilmiy – amaliy anjuman 2024 yil 3 may, Toshkent, 662-667 B., 2024;
15. Myung-Jin Kim, H.-J. Lee, D.-H. Kim, F. Yoshida, S.-M. Lee, P. Bartczak, G. Dudzinski, J. Park, Y.-J. Choi, H.-K. Moon, C.-H. Kim, H.-S. Yim, J. Choi, E.-J. Choi, J.-N. Yoon, A. Serebryanskiy, M. Krugov, I. Reva, **K.E. Ergashev**, O. Burkhonov, S.A. Ehgamberdiev, Y. Turayev, Z.-Y. Lin, T. Arai, K. Ohtsuka, T. Ito, S. Urakawa, M. Ishiguro, B.-C. Lee, D.-G. Roh, H. Seo “*Rotational and Surface Properties of NEA 3200 Phaethon*” // LPSC 2019, The Woodlands, Texas, March 18–22, 2019;
  16. **K.E. Ergashev**, O.A. Burkhonov “Results of minor planet study of solar system in astronomical institute” // The International Symposium “New trends of development fundamental and applied physics: problems, achievements and prospects”. Tashkent, November 10-11, 2016, pp. 122-123.;
  17. O.A. Burkhonov, Sh.A. Ehgamberdiev, **K.E. Ergashev**, F. Yoshida, T. Ito, Yu.N. Krugly. “*The Study of minor planets at the Maidanak observatory*” // “APRIM-2014” 12<sup>th</sup> Asia-Pacific Regional IAU Meeting. DCC, Daejeon, Korea. pp. 98. Aug. 18-22, 2014.
  18. **K.E. Эргашев**, Р.И. Тожиев, Х.Б. Султанов. *Потенциал хавфли 414286 (2008 ОС6) ва 105140 (2000 NL10) астероидларининг даврий вақт қаторлари таҳлили*. ЎР ФА Ёш олимлар ахборотномаси, №4(3), 74-76Б., Тошкент, 2023;
  19. P. Pravec, K., Hornoch K., Kuchakova H., Fatka P., **K. Ergashev**, O. Burkhonov. (458732) 2011 MD\_5. CBET (Central Bureau Electronic Telegrams)., Electronic Telegram No. 5287., 2023; [cbat.eps.harvard.edu/iau/cbet/005200/CBET005287.txt](http://cbat.eps.harvard.edu/iau/cbet/005200/CBET005287.txt)
  20. **K.E. Ergashev**, R.I. Tojiyev. (2023 HO6) va 429733 (2011 LX10) *asteroidlarining fotometrik tahlili* Fizika fanining rivojida iste’dodli yoshlarning o‘rni RIAK-XVII-2024. O‘zMU, Toshkent, 76-78 b., 2024;
  21. **K.E. Ergashev**, R.I. Tojiyev. 154244 (2002 KL6) *Asteroidining optik kuzatuvlar tahlili*. Fizika fanining rivojida iste’dodli yoshlarning o‘rni RIAK-XVII-2024. O‘zMU, Toshkent, 79-80 b., 2024;
  22. **K.E. Ergashev**. *Yerga yaqinlashuvchi Apollonlar guruhidagi 17511 (1992 QN) asteroidining optik kuzatuvlari*. Fizika fanining rivojida iste’dodli yoshlarning o‘rni RIAK-XVI-2023. 85-88 B., O‘zMU, Toshkent, 2023;
  23. **K.E. Ergashev**. *Potensial xavfli 414286 (2008 ОС6) asteroidining davriy vaqt qatorlari tahlili*. Fizika fanining rivojida iste’dodli yoshlarning o‘rni RIAK-XVI-2023. 88-90 B., O‘zMU, Toshkent, 2023;
  24. **К.Э. Эргашев**. *Астероидлар бош-белбоғи икки объектнинг фотометрик таҳлили*. «Фан, таълим ва ишлаб чиқаришни ривожланишида ёш олимларнинг ўрни» Республика илмий ва илмий-назарий анжумани материаллари, 2022 йил 30 сентябрь, б. 122-125, Тошкент, 2022;

25. **K.E. Ergashev**, O.A. Burkhonov “*Lightcurve and period analysis of the asteroid (16408) 1986 AB*” // “Fizika fani muammolari va uning rivojida iste’dodli yoshlar o‘rni” Respublika ilmiy anjumani materiallari (RIAK-X, 2017). Toshkent, O‘zMU, 2017., 104-106.;
26. **K.E. Ergashev**, O.A. Burxonov “*(19516) 1999 QF80 asteroidining kuzatuvlari va fotometrik tahlili*” // “Fizika fani muammolari va uning rivojida iste’dodli yoshlar o‘rni” Respublika ilmiy anjumani materiallari (RIAK-X, 2017). Toshkent, O‘zMU, 2017., 150-151.;
27. **K.E. Ergashev** “*(4426) Roerich asteroidining optik kuzatuvlari va fotometrik tahlili*” // “Fizika fanining rivojida iste’dodli yoshlarning o‘rni”. Ilmiy - amaliy konferensiya (IAK8-2015) maqolalar to‘plami. 2-tom. Toshkent, O‘zMU, 2015. 162-164 b;
28. **Ergashev K.E.**, Burxonov O.A. “*Adamcarolla asteroidining optik kuzatuv natijalari va fotometrik tahlili*” // “XXI asr - intellektual avlod asri” Yosh olim va talabalarning ilmiy - amaliy konferensiyasi materiallari. IV qism - Aniq va texnika fanlari. Toshkent, O‘zMU, 2014., 45-47.;
29. **К.Э. Эргашев**, O.A. Бурхонов. “*Период вращения астероида (4221) Picasso*”, Республиканской научно-практической конференции молодых ученых. Ташкент, АНПУз, 2014., 70-71.;
30. **K.E. Ergashev**. “*(3076) Garber asteroidining fotometrik tahlili va davriy yorqinlik egri chizig‘i*” // “Fizika fanining rivojida iste’dodli yoshlarning o‘rni” (RIAK-VI). Toshkent, O‘zMU, 2013., 150-152.;