

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ АСТРОФИЗИКИ

На правах рукописи



РАХМАТУЛЛАЕВА Фируза Джамшедовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ИЗБРАННЫХ АКТИВНЫХ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ
ПО ОПТИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ**

01.03.01 – астрометрия и небесная механика

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
член-корреспондент НАН Таджикистана,
доктор физико-математических наук,
Кохирова Гулчехра Исроиловна

Душанбе – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА I. ПОПУЛЯЦИЯ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	27
1.1. Семейства активных объектов среди астероидов и комет.....	27
1.2. Оптические наблюдения активных объектов.....	36
1.3. Методика астрометрической обработки.....	41
1.4. Методы фотометрической обработки.....	45
Выводы по главе I	49
ГЛАВА II. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНЫХ АСТЕРОИДОВ (596) ШЕЙЛА И (3552) ДОН КИХОТ	51
2.1 Исследование вспышечной активности астероида (596) Шейла	51
2.1.1. Результаты фотометрических наблюдений астероида.....	53
2.1.2. Результаты наблюдений астероида (596) Шейла в 2017 году	56
2.1.3. Определение координат и орбиты.....	58
2.1.4. Определение видимых и абсолютных звездных величин, показателей цвета и оценка диаметра астероида (596) Шейла	61
2.1.5. Причина вспышечной активности астероида (596) Шейла.....	67
2.2. Результаты наблюдений вспышечной активности астероида (3552) Дон Кихот	69
2.2.1. Определение динамических свойств	73
2.2.2. Исследование физических свойств астероида Дон Кихот блеск, кривая блеска, показатели цвета, диаметр, морфология.....	78
2.2.3. О природе околоземного астероида (3552) Дон Кихот.....	84
Выводы по главе II	86
ГЛАВА III. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВОЙСТВЕННОГО ОБЪЕКТА 2008GO98 (362P).....	88
3.1 Результаты наблюдений двойственного объекта	88
2008GO98 (362P) в 2017 г.....	88
3.2. Определение координат и орбиты объекта 2008GO98 (362P)	91

3.3. Определение физических свойств объекта 2008 GO98 (362P).....	95
3.4. Пылепроизводительность объекта 2008 GO98 (362P)	99
3.5. Морфология комы	100
3.6. О природе двойственного объекта 2008 GO98 (362P)	101
Выводы по главе III.....	103
ГЛАВА IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ КОМЕТ 29P/ШВАССМАНА-ВАХМАНА 1 и P/2019 LD2 (ATLAS)	104
4.1. Комета 29P/Швассмана-Вахмана 1 из группы кентавров и результаты ее фотометрических наблюдений	104
4.1.1. Определение физических свойств кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1: блеск, показатели цвета, диаметр.....	109
4.1.2. Морфология комы кометы 29P	113
4.1.3. Результаты наблюдений кометы 29P в 2021 г.	115
4.1.3.1. Блеск и показатели цвета.....	115
4.1.3.2. Морфологические особенности кометы 29P в октябре 2021 г. 	117
4.1.4. О причинах вспышечной активности кометы 29P	122
4.2. Комета переходной группы P/2019 LD2 (ATLAS) и результаты ее фотометрических наблюдений	125
4.2.1. Определение физических свойств кометы P/2019 LD2 (ATLAS):...	128
4.2.2. Пылепроизводительность кометы P/2019 LD2 (ATLAS).....	131
4.2.3. Структура пылевого хвоста кометы P/2019 LD2 (ATLAS).....	132
4.2.4. О происхождении кометы P/2019 LD2 (ATLAS)	135
Выводы по главе IV.	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	138
БЛАГОДАРНОСТИ.....	141
ЛИТЕРАТУРА	142
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	158

ВВЕДЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена исследованию малых тел Солнечной системы, проявляющих не свойственную им активность. Целью работы является выявление активности у объектов, определение динамических и физических свойств и возможных причин активности, установление их природы и происхождения. Для решения поставленной задачи в астрономической обсерватории Санглов Института астрофизики НАНТ, Крымской астрофизической обсерватории РАН и станции Лесники Астрономической обсерватории КНУ им. Т.Г. Шевченко выполнены оптические наблюдения избранных активных астероидов и комет, проведена астрометрическая и фотометрическая обработка полученных изображений. С помощью современных теорий и методик определены основные динамические и физические характеристики, рассмотрены возможные механизмы, ответственные за наблюдаемую активность и сделаны выводы о возможной природе изученных объектов. Для большинства объектов подтверждена активность, получены новые данные о динамических и физических свойствах сравнительно недавно открытых новых группах малых тел Солнечной системы - активных астероидов (АА), комет Главного пояса астероидов (ГПА), объектов группы кентавров и переходного класса, объектов с двойным статусом. Особое внимание уделено активным астероидам и кометам Главного пояса астероидов. Речь идет о переходном между кометами и астероидами классе объектов, расположенных в Главном поясе астероидов и обнаруженных в последние годы. Объекты этой группы имеют динамические характеристики, типичные для астероидов Главного пояса, а именно, их орбиты находятся внутри орбиты Юпитера и для них критерий Тиссерана T_j больше 3, но они проявляют признаки атмосфер и активность, что свойственно кометам. Этот признанный класс объектов и называют кометами Главного пояса (КГП) или активными астероидами (Jewitt et al. 2009, Hsieh et al. 2009a,b). Активные астероиды имеются также и в популяции астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). Кроме того, среди

АСЗ имеется небольшая фракция т.н. “уснувших” или “угасших” комет (Orík 1963, Wiessman et al. 1989, Бабаджанов, Кохирова 2009). Их исследование дает одну из немногих возможностей прямых определений физических характеристик кометных ядер и это придает особую актуальность проблемам изучения угасших комет. Другими объектами Солнечной системы, которые, возможно, сочетают свойства и безатмосферных тел и комет, являются кентавры. Однако динамические характеристики “угасших” комет и кентавров все же значительно отличаются и между собой, и от переходных объектов Главного пояса. Обнаружение кометной активности астероида (596) Шейла и других объектов подтверждает наличие переходного класса тел между астероидами и кометами (Larson 2010, Larson et al. 2010, Jewitt 2012, Jewitt et al. 2015).

Разделение двойственных объектов на семейства связано с их расположением в Солнечной системе. Однако, независимо от их местоположения, причины внезапного появления признаков кометной активности у объектов, у которых она не ожидалась, необходимо изучать отдельно для каждого из них.

К настоящему моменту из наблюдений известны следующие кометы ГПА и активные астероиды: (3200) Phaethon, 311P/(P/2013 P5) (PANSTARRS), P/2010 A2 (LINEAR), (1) Ceres, (2201) Oljato, P/2012 F5 (Gibbs), 259P/Garradd (P/2008 R1), (596) Scheila, 288P/(300163) 2006 VW139, (62412) 2000 SY178, P/2013 R3 (Catalina-PANSTARRS), 133P/(7968) Elst-Pizarro, 176P/(118401) LINEAR, 238P/Read (P/2005 U1), P/2012 T1 (PANSTARRS), 313P/Gibbs (P/2014 S4), 324P/2010 R2 (La Sagra), 107P/(4015) Wilson-Harrington, 331P/Gibbs, (6478) Gault, (248370) 2005 QN173 (Jewitt 2012, Jewitt et al. 2015, Jewitt et al. 2021, Luu et al. 2021).

Актуальность изучения КГП обусловлена тем, что они, по-видимому, образуют третий резервуар комет в Солнечной системе (после облака Оорта и пояса Койпера) (Jewitt et al. 2009, Hsieh et al. 2009a,b). Сравнение объектов из трех резервуаров позволяет изучить протопланетный диск Солнца в трех

областях: кометы (астероиды) Главного пояса, расположенные на расстоянии около 2.2–3.6 а. е. с температурой формирования $\sim 150\text{--}200\text{ K}$ в зависимости от расстояния от Солнца и свойств поверхности (Masiero et al. 2012); кометы пояса Койпера и кометное облако Оорта, сформированные, соответственно, на больших гелиоцентрических расстояниях и меньших равновесных температурах.

В настоящее время имеется не так уж много наблюдательных данных по активным телам Солнечной системы и в этой связи имеются большие пробелы в понимании природы и обстоятельств происхождения таких объектов. Более того, каждый из них обладает своими специфическими особенностями, вследствие чего является предметом отдельного исследования. Поэтому проведение оптических наблюдений активных объектов, определение их динамических и физических характеристик на основе наблюдательных данных, установление достоверных механизмов внезапного появления кометной активности у астероидов, проявляющейся в виде выброса пыли и образования типичных кометных хвостов, и выявление их связи с другими телами Солнечной системы сегодня являются чрезвычайно актуальными задачами. Такие исследования относятся к фундаментальной проблеме происхождения и взаимосвязи малых тел Солнечной системы.

Актуальность работы

Популяция малых тел Солнечной системы состоит из комет, астероидов и продуктов их распада – метеороидов. До недавнего времени считалось, что нет никаких преград в различении астероидов от комет. По наземным наблюдениям они выглядят совершенно различно, комета имеет кому и хвост, астероид выглядит подобно звезде. Считается, что кометы - это ледяные тела, тогда как астероиды – каменные или железокаменные образования. Различаются они и орбитами, кометы двигаются по кометоподобным орбитам, которые отличаются от астероидных орбит. Физические свойства свидетельствуют о различных источниках

происхождения комет и астероидов. Однако, с открытием активных астероидов, комет Главного пояса, кентавров, объектов с двойным статусом стало понятно, что сложившееся разделение комет и астероидов не столь однозначно, как подразумевалось. Присутствие АА, КГП, объектов с двойным статусом в Главном поясе астероидов указывает на более тесную связь астероидов и комет, чем это считалось ранее, а также свидетельствует о том, что ледяные тела из Главного пояса астероидов вполне могут быть потенциальными «поставщиками» воды (Jewitt et al. 2015).

Предполагается, что эти объекты нового класса образовались в более теплой области Солнечной системы, находящейся в пределах орбиты Юпитера, в отличие от других комет из пояса Койпера и облака Оорта (Masiero et al. 2012). Изучение и сравнение объектов из трех резервуаров позволяют изучить протопланетный диск Солнца в трех соответствующих областях - Главный пояс астероидов, кометный пояс Койпера и кометное облако Оорта. В связи с этим активные малые тела имеют чрезвычайно важное место в астрономических исследованиях, их изучение обеспечивает получение более детальных сведений об условиях и процессах возникновения Солнечной системы в ее различных регионах, а также сделать предположение о возможных путях «доставки» воды на Землю. Наблюдения и изучение таких активных объектов являются основной проблемой, рассмотренной в диссертации.

Вышеприведенные факты составляют фундаментальную значимость исследования активных малых тел Солнечной системы.

Практическая значимость этой проблемы связана, в первую очередь, с проблемами астероидно-кометной опасности, для решения которой очень важно знать динамические и физические особенности объектов, представляющих потенциальную опасность столкновения с Землей. Известные события вторжения космических объектов в земную атмосферу подтверждают реальность космических угроз для Земли. Для выработки стратегий предотвращения и смягчения опасных столкновений необходимо

иметь сведения о природе таких тел, так как последствия столкновений сильно зависят от состава и структуры объекта. Другая особая важность этого направления связана с необходимостью решения новых проблем нашей планетной системы, таких, как задача поиска принципиально новых источников сырьевых ресурсов в околоземном космическом пространстве. Без знания физических характеристик и свойств как можно большего числа астероидов и комет невозможно решить отмеченные выше фундаментальные и прикладные проблемы, связанные с ними. Кроме того, результаты, полученные в работе, могут быть использованы для постановки новых задач, в том числе, решаемых с помощью космических миссий к кометам и астероидам.

С этим связана научная и прикладная актуальность выбранной тематики исследования.

Цели и задачи диссертационной работы

Основной целью диссертационной работы является определение и исследование динамических и физических свойств активных астероидов, как из Главного пояса астероидов, так и из популяции астероидов, сближающихся с Землей, объекта с двойным статусом, кометы из группы кентавров и кометы, находящейся на стадии перехода из группы кентавров к кометам семейства Юпитера, используя данные оптических наблюдений, и на этой основе сделать заключение об их природе. Для достижения поставленной цели в диссертации на основе выполненных многоцветных оптических наблюдений избранных активных объектов, астрометрической и фотометрической обработки их изображений, решены следующие задачи:

1. Определены координаты и вычислена орбита активного астероида ГПА (596) Шейла, определены звездные величины, построены кривые блеска, оценен эффективный диаметр, показатели цвета и период вращения астероида. Выполнен сопоставительный анализ результатов, полученных по наблюдениям в 2011 г. и в 2017 г., а также с имеющимися данными по

кометам из различных популяций. Исследована вспышечная активность астероида и установлена ее причина.

2. Определены координаты, орбита, звездные величины, кривые блеска, эффективный диаметр и показатели цвета активного астероида (3552) Дон Кихот из популяции АСЗ. Исследована вспышечная активность в период наблюдений, анализ суммарных изображений подтвердил наличие слабой пылевой комы у астероида. Выполнен сопоставительный анализ полученных результатов с имеющимися данными по другим наблюдениям и сделано предположение о природе астероида.

3. Определены координаты, орбита, звездные величины, кривая блеска, эффективный диаметр и параметр пылепроизводительности активного объекта ГПА с двойным статусом, т.е. имеющего и астероидное (457175) 2008 GO98, и кометное 362P наименования. Исследована вспышечная активность в период квазисинхронных наблюдений, проанализированы суммарные изображения, выполнен сопоставительный анализ полученных результатов с имеющимися данными по другим наблюдениям, установлена причина вспышечной активности, зарегистрированной в 2017 г., сделано предположение о природе объекта.

4. Определены блеск и его изменение, показатели цвета, эффективный диаметр ядра кометы 29P, относящейся к активным объектам группы кентавров. Изучена морфология и выявлены две пылевые структуры в коме кометы по наблюдениям в 2017 г., короткий хвост и два мощных джета - по наблюдениям в 2021 г. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов с имеющимися данными по комете 29P и другим кометам из различных популяций. Рассмотрены возможные механизмы, ответственные за вспышечную активность кометы на далеких гелиоцентрических расстояниях.

5. Определены блеск, параметр пылепроизводительности и верхний предел диаметра ядра кометы P/2019 LD2 (ATLAS). На основе новых фотометрических данных изучена активность кометы. Для выявления

распределения яркости вдоль хвоста и структуры хвоста построены изофоты и диаграммы Финсона-Пробстейна. Выполнен анализ орбиты кометы.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Определены динамические и физические свойства активного астероида ГПА (596) Шейла в периоды многоцветных оптических наблюдений, выполненных в 2011 г. и 2017 г., построены кривые блеска, найдены показатели цвета и уточнен период вращения астероида. Установлено, что вспышечная активность астероида Шейла носит эпизодический характер. Показано, что столкновение с малым телом в 2010 г. не привело ни к полному распаду астероида, ни к катастрофическому изменению его поверхности, астероид сохранил орбиту и абсолютный блеск.

2. На основе многоцветных оптических наблюдений активного астероида (3552) Дон Кихот из популяции АСЗ получены динамические, физические характеристики и построены кривые блеска на момент мониторинга, оценены ранее неизвестные показатели цвета астероида. Во время наблюдений у астероида зарегистрирована вспышка блеска и выявлена слабая пылевая кома, типичная для комет. Сделано заключение, что с высокой вероятностью астероид в действительности является ядром угасшей кометы.

3. Определены динамические и физические характеристики активного объекта ГПА 2008 GO98 (362P) в период квазисинхронных оптических наблюдений, построена кривая блеска в фильтре R. Зарегистрирована вспышка в период наблюдений и обнаружена кометная активность в виде пылевой комы и хвоста. Получена ранее не известная оценка параметра пылепроизводительности, подтверждающая активную стадию объекта. Сделано предположение о кометном происхождении астероида. Показано, что реактивация угасшего кометного ядра в 2017 г. могла произойти в результате столкновения с другим объектом или связана с сублимационными процессами на поверхности объекта.

4. На основе многоцветных оптических наблюдений кометы 29P определены физические свойства и изучена морфология комы. Выявлено наличие пылевых структур в коме кометы по наблюдениям в 2017 г., а также присутствие короткого хвоста и двух мощных джетов – по наблюдениям в 2021 г. На основе наших данных доказана принадлежность кометы к активным объектам группы кентавров. Предложен возможный механизм, ответственный за вспышечную активность кометы на больших гелиоцентрических расстояниях.

5. Определены физические параметры кометы P/2019 LD2 (ATLAS) в период оптических наблюдений в 2020 г. Вычислен ранее не известный параметр пылепроизводительности и выявлена повышенная кометная активность, построена структура пылевой комы и показано, что вблизи поверхности ядра находятся самые крупные пылевые частицы размером более 100 мкм, по мере удаления от ядра размеры частиц уменьшаются.

Научная новизна

1. Впервые на основе длительного ряда наблюдений установлено, что вспышка и признаки кометной активности астероида (596) Шейла в 2010 г. носят эпизодический характер, причиной явилось столкновение с небольшим метеороидом.

2. Впервые зарегистрирована вспышка астероида (3552) Дон Кихот 14 июля 2018 г. и предложено объяснение причины реактивации - столкновение с небольшим объектом или бомбардировка поверхности мелкими метеороидами. На основе новых фотометрических данных предложено астероид считать ядром угасшей кометы.

3. Впервые проведены квазисинхронные оптические наблюдения активного двойственного объекта ГПА (457175) 2008 GO98. В результате, впервые 30 июля 2017 г. зарегистрирована вспышка его яркости, выявлено снижение активности к 14 сентября 2017 г. и установлен эпизодический

характер активности. Принадлежность объекта к фракции угасших комет на основе новых данных предположена впервые.

4. Впервые исследована морфология кометы 29P в периоды вспышечной активности по наблюдениям в 2017 г. и в 2021 г. и подтверждено, что активная стадия кометы проявилась в виде образования пылевых джетов. Впервые показано, что вспышка блеска в 2021 г. является одной из самых мощных по интенсивности. На основе новых данных подтверждена реальность механизма, ответственного за наблюдаемую активность и объясняющего причины выброса пылевых частиц на больших гелиоцентрических расстояниях.

5. Впервые на основе оптических наблюдений сравнительно недавно открытой кометы P/2019 LD2 (ATLAS) исследовано распределение яркости вдоль внутренней и видимой части пылевого хвоста кометы и выявлена его структура. Впервые построена модель распределения пылевых частиц в зависимости от времени выброса и размера.

Научная и практическая значимость

Исследование физико-динамических особенностей малых тел Солнечной системы, проявляющих не свойственную им активность, по данным оптических наблюдений имеет и фундаментальное научное значение для установления их происхождения и взаимосвязей, и важное прикладное значение.

Результаты исследования вспышечной активности астероида ГПА (596) Шейла, астероида, сближающегося с Землей (3552) Дон Кихот, объекта с двойным статусом 2008 GO98, кометы 29P из группы кентавров и кометы P/2019 LD2 (ATLAS), находящейся на стадии перехода из группы кентавров в кометы семейства Юпитера, выявление обстоятельств их вспышек имеют важное значение для изучения такой активности в случаях ее проявления другими малыми телами Солнечной системы. Как показывает наблюдательная практика, таких событий становится все больше, и для лучшего понимания их природы необходимо иметь больше данных по

индивидуальным случаям. Определение свойств и установление происхождения исследованных активных малых тел крайне важны для исследования образования и эволюции Солнечной системы.

В частности, результаты исследования кометы 29P имеют большое значение для лучшего понимания природы активных объектов группы кентавров. Об этих объектах с двойственными свойствами достоверные сведения все еще недостаточно накоплены и необходимо детально изучать каждый из них отдельно. Возможный механизм ответственный за кометную активность на больших гелиоцентрических расстояниях может быть протестирован на других объектах с таким же типом активности.

Впервые полученные результаты всестороннего изучения кометы P/2019 LD2 (ATLAS) важны для установления обстоятельств перехода малых тел из одной динамической группы в другую. Полученные из наблюдений новые результаты о физических и динамических свойствах активных малых тел существенно восполняют недостаток сведений по таким объектам, имеющийся в различных базах данных и каталогах. Они необходимы для решения современных проблем астрономии, связанных с изучением условий образования Солнечной системы, для определения источников происхождения и выявления родственных связей между малыми телами Солнечной системы.

С практической точки зрения результаты исследований важны для учета астероидно-кометной опасности для космических миссий, необходимы для решения проблемы астероидно-кометной опасности столкновения с Землей и в задаче поиска принципиально новых источников сырьевых ресурсов, а также помогут в постановках новых научных задач во время проведения наблюдений АСЗ космическими аппаратами.

Достоверность

Достоверность научных результатов и выводов, полученных в работе, основывается на фактическом наблюдательном материале и на использовании современных апробированных и объективных методах

исследований, разработанных в ведущих отечественных и зарубежных астрономических учреждениях. Различные аспекты работы, положенные в основу диссертации, прошли экспертизу и выполнялись по темам научных исследований Отдела межпланетных тел Института астрофизики НАНТ.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах «Малые тела Солнечной системы» Института астрофизики Национальной академии наук Таджикистана, а также были представлены на научных республиканских и международных конференциях:

- Международная конференция «Современные проблемы астрофизики», посвященная 100-летию со дня рождения академика НАНТ Добровольского О.В., Таджикистан, Душанбе, 4-5 декабря 2014 г.,
- Международная конференция «Околоземная астрономия 2015», Россия, п. Терскол, Кабардино-Балкария, 31 августа – 5 сентября 2015 г.,
- X Международная конференция «Околоземная астрономия» приуроченная к 60-летию запуска первого спутника Земли, Россия, Краснодарский край, п. Агой, 2-5 октября 2017 г.,
- Международная астрометрическая конференция «Пулково-2018», ГАО РАН, Россия, Санкт-Петербург, 1-5 октября 2018 г.,
- Международная научная конференция «Околоземная астрономия и космическое наследие 2019», Россия, Республики Татарстан, г. Казань, 30 сентября – 4 октября 2019 г.,
- Международная научная конференция «Успехи астрофизической науки в Таджикистане, связанные с исследованием околоземного космического пространства», посвященная 90-летию академика НАНТ П.Б. Бабаджанова, Республика Таджикистан, г. Душанбе, 15 октября 2020 г.,
- Международная научная конференция «Astronomy and Space Physics», посвященная 175-летию Астрономической обсерватории

Национального университета им. Т. Шевченко, г. Киев, Украина, 26-28 мая 2020 г.,

- Международная научная конференция «Метеоры и небесные объекты, погода и космос: от данных и технологий к наследию и развитию» (Семинар Кащеева), Харьков, Украина, 29-31 марта 2021 г.,
- Международная конференция «VI Бредихинские чтения», Россия, Заволжск, 24-26 апреля 2021 г.,
- Международная конференция «52-nd Lunar and Planetary Sciences», The Woodlands, Техас, США, 15-19 марта 2021 г.

Личный вклад соискателя

Соискатель непосредственно участвовала в постановке задач, наблюдениях, астрометрической и фотометрической обработке изображений, разработке методов наблюдений, определения параметров и их исследования, проведении вычислений, подготовке публикаций результатов и выводов. Публикации и доклады на конференциях были подготовлены в равных долях с другими соавторами.

По теме диссертации опубликовано 18 работ в рецензируемых научных изданиях, 12 из которых – в научных изданиях, рекомендованных ВАК, 8 из них входят в международные реферативные базы данных и системы цитирования (WoS и Scopus).

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК

1. Кохирова Г.И., Иванова А.В., Рахматуллаева Ф.Дж., Хамроев У.Х., Буриев А.М., Абдуллоев С.Х. Результаты комплексных наблюдений астероида (596) Scheila в Международной астрономической обсерватории Санглов//Астрономический вестник. – 2018. – Т. 52. – № 6. – С. 511–520. (WoS).

2. Kokhirova G.I., Ivanova O.V., Rakhmatullaeva F.D., Khamroev U.Kh., Buriev A.M., Abdulloev S.Kh. Results of Complex Observations of Asteroid (596)

Scheila at the Sanglokh International Astronomical Observatory//Solar System Research – 2018. – Vol. 52. – № 6. – P. 495–504. (WoS/Scopus).

3. Кохирова Г.И., Иванова А.В., Рахматуллаева Ф.Дж. Вспышечная активность астероида Дон Кихот по наблюдениям в обсерватории Санглох// Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2019. – Т. 62. – № 5–6. – С.292–302. (БАК).

4. Кохирова Г.И., Иванова А.В., Рахматуллаева Ф.Дж., Буриев А.М., Хамроев У.Х. Определение координат и орбиты астероида Дон Кихот по наблюдениям в обсерватории Санглох//Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2020. – Т. 63. – № 1–2. – С. 55-61. (БАК).

5. Кохирова Г.И., Иванова А.В., Рахматуллаева Ф.Дж., Баранский А., Буриев А.М. Результаты наблюдений двойственного объекта 2008GO98 (362P) в 2017//Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2020. – Т. 63. – № 5–6. – С. 328–341. (БАК).

6. Кохирова Г.И., Рахматуллаева Ф.Дж., Борисенко С.А. Результаты наблюдений кометы P/2019 LD2 в обсерватории Санглох//Доклады Национальной академии наук Таджикистана. – 2021. – Т. 64. – № 5–6. – С. 291–301. (БАК).

7. Кохирова Г.И., Иванова А.В., Рахматуллаева Ф.Дж. Подтверждение кометной природы астероида Дон Кихот по наблюдениям в обсерватории Санглох//Астрономический вестник. – 2021. – Т 55. - № 1. – С.74–83. (WoS).

8. Кохирова Г.И., Рахматуллаева Ф.Дж., Борисенко С.А. Результаты фотометрических наблюдений кометы P/2019 LD2 в обсерватории Санглох//Астрономический вестник. – 2021. – Т. 55. – № 5. – С.408–415. (WoS).

9. Kokhirova G.I., Ivanova A.V., Rakhmatullaeva F.D., Buriev A.M., Khamroev U.Kh. Astrometric and Photometric Observations of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 at the Sanglokh International Astronomical Observatory//Planetary and Space Science. – 2020. – Vol. 181. –104794 (6p.). (WoS/Scopus).

10. Kokhirova G.I., Ivanova A.V., Rakhmatullaeva F.D., Baransky A.V., Buriev A.M. Results of dual-status objects 2008 GO98 in 2017//Advances in space research. – 2021. – Vol.67. – P. 639-647. (WoS/Scopus).

11. Kokhirova G. I., Rakhmatullaeva F. D., and Borisenko S. A. Results of Photometric Observations of Comet P/2019 LD2 at the Sanglokh Observatory//Solar System Research. – 2021. – Vol. 55. – № 5. – P. 408–415. (WoS/Scopus).

12. Borysenko S.A., Kokhirova G.I., Rakhmatullaeva F.D. Some physical properties of a new Jupiter-family comet P/2019 LD2 (ATLAS) from broadband observations//Icarus. – 2022. – Vol. 372. – Article id. 114752. (WoS/Scopus).

Другие публикации автора по теме диссертации

13. Киселев Н.Н., Рахматуллаева Ф.Дж., Антонюк А.К., Пить Н. Относительная фотометрия астероида Шейла//Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2014. – Т. 57. – №11-12. – С. 823-828.

14. Кохирова Г.И., Иванова А.В., Рахматуллаева Ф.Дж., Хамроев У.Х., Абдуллоев С.Х. Результаты наблюдений астероида (596) Scheila в обсерватории Санглох//Доклады Академии наук Республики Таджикистан. - 2018. – Т.61. – №3. – С.241–249.

15. Кохирова Г.И., Иванова А.В., Буриев А.М., Хамроев У.Х., Рахматуллаева Ф.Дж. Комплексные наблюдения кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 в обсерватории Санглох//Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2018. – Т. 61. – № 9–10. – С.742–751.

16. Kokhirova G.I., Ivanova O.V., Rakhmatullaeva F.D. Results of observations of asteroid Don Quixote at the Sanglokh observatory//INASAN Science Reports. – 2020. – Vol. 5. – № 4. – P. 196–200.

17. Kokhirova G.I., Ivanova O.V., Rakhmatullaeva F.D., Buriev A.M., Khamroev U.Kh. Results of observations of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 in Sanglokh observatory//INASAN Science Reports. – 2020. – Vol. 5 – № 3. – P. 146–152.

18. Kokhirova G.I., Ivanova O.V., Rakhmatullaeva F. D. Evidence of the Cometary Nature of Asteroid Don Quixote Provided by Observations at the Sanglokh Observatory// INASAN Science Reports. – 2021. – Vol. 55. – № 1. – P. 61–70.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 186 работ. Общий объем диссертации 159 страницы, в том числе 35 рисунков и 28 таблиц.

Содержание работы

Во Введении даются краткие определения объектов исследования, обоснована актуальность темы, определены основные цели диссертации и пути их достижений, сформулированы основные положения, вынесенные на защиту, отмечена научная новизна, кратко описано содержание диссертации.

В первой главе рассматривается популяция малых тел Солнечной системы, текущее состояние проблемы их изучения и методы обработки оптических наблюдений комет и астероидов. В §1.1 приведены сведения об известных к настоящему моменту семействах активных малых тел Солнечной системы. Рассмотрены астероиды и, в частности, активные астероиды, кометы, угасшие кометные ядра, кометы Главного пояса астероидов, объекты с двойным статусом. §1.2 посвящен методам и задачам оптических наблюдений активных объектов, даны некоторые результаты, имеющиеся к настоящему времени, и задачи, которые еще не решены. В §1.3 рассмотрен метод астрометрической обработки оптических наблюдений комет и астероидов и используемый в работе программный пакет астрометрической обработки, рассмотрены общности и различия в обработке изображений комет и астероидов. Кратко приведен метод определения координат и вычисления орбит объектов. В §1.4 дано описание метода фотометрической обработки изображений комет и астероидов, определения видимого и абсолютного блеска объектов. Даны сведения об используемых в работе каталогах звезд сравнения, о точности приведенных в них сведениях.

Кратко описаны программные пакеты, с помощью которых выполнялась фотометрическая обработка изображений активных объектов. Глава 1 завершается выводами исследования в данном разделе.

Во второй главе приведены результаты наблюдений и исследования активных астероидов. В §2.1 даны сведения об имеющихся к настоящему времени результатах исследований вспышечной активности астероида ГПА (596) Шейла. В §2.1.1 приведены результаты многоцветных фотометрических наблюдений астероида (596) Шейла в 2011 г. Показано, что, несмотря на проявленную вспышечную активность в 2010 г., видимый блеск астероида по измерениям в 2011 г. соответствует эфемеридной величине, следовательно, объект находился в неактивном состоянии. В §2.1.2 приведены результаты многоцветных оптических наблюдений астероида (596) Шейла в обсерватории Санглох в 2017 г., выполненных в целях поиска признаков новой активности у этого объекта. Здесь даны обстоятельства мониторинга, детали методик астрометрической и фотометрической обработки изображений. Для полновесности исследования, изучены динамические свойства астероида (596) Шейла в период наблюдений и результаты представлены в §2.1.3. Измерены экваториальные координаты и вычислена орбита, показано, что динамические свойства астероида сохраняют стабильность и соответствуют каталожным данным. В §2.1.4 приведены результаты определения видимых и абсолютных звездных величин, показателей цвета, оценки диаметра и периода вращения астероида (596) Шейла. Показано соответствие измеренного блеска эфемеридному значению, выявлено отсутствие значительных изменений блеска в период мониторинга, оценки диаметра и периода вращения согласуются с результатами измерений по другим наблюдениям, показатели цвета соответствуют средним величинам для астероидов P- и D-типов. В §2.1.5. приведен анализ вспышечной активности астероида (596) Шейла, основанный на наших измерениях и определении динамических и физических свойств, и на других опубликованных данных. Сделано

закключение, что вспышечная активность астероида в 2010 г. является эпизодической, причиной явилось столкновение с малым телом, не приведшее к катастрофическим изменениям поверхности астероида. Вероятнее всего, астероид практически сохранился, а последствия удара выразились в кратерообразовании на поверхности и выбросе огромного облака пыли, проявившегося в виде кометной активности. В действительности объект 596 является истинным астероидом. В §2.2 приведены результаты наблюдений вспышечной активности астероида, сближающегося с Землей, (3552) Дон Кихот. Здесь принято во внимание, что ранее активность астероида была зарегистрирована в инфракрасном и в марте 2018 г. – впервые и в оптическом диапазоне (Mommert et al. 2014, 2018a,b). Эти наблюдательные факты и наши наблюдения подтверждают эпизодический характер активности астероида. Рассмотрены имеющиеся сведения по астероиду, предположения о причинах его вспышечной активности и возможные механизмы, ответственные за наблюдаемую в инфракрасном и оптическом диапазоне активность, приведена гипотеза о кометном происхождении объекта, ныне находящегося в угасшей стадии и факты, подтверждающие ее. Даны обстоятельства многоцветных оптических наблюдений астероида в обсерватории Сангloch в 2018 г., детали методик астрометрической и фотометрической обработки изображений. Результаты определения динамических свойств астероида приведены в §2.2.1. Найдены экваториальные координаты, достаточная точность определения координат позволила вычислить орбиту. Показано, что, несмотря на зарегистрированную вспышку, орбита астероида является стабильной. В §2.2.2 приведены результаты исследования физических свойств, измерен видимый и найден абсолютный блеск, построены кривые блеска и показано, что 14 июля 2018 г. нами зарегистрирована вспышка астероида, которая практически завершилась к 24 июля. Этот факт подтвердили фазовая кривая блеска астероида и оценка диаметра по измерениям 14 июля. Размер астероида – эффективный диаметр по измерениям других ночей хорошо

согласуется с каталожными данными. Показатель цвета (V-R), найденный 14 июля, соответствует средней величине активных комет семейства Юпитера, тогда как в остальные ночи этот показатель соответствует величине показателя цвета угасших ядер короткопериодических комет. Это связано с тем, что 14 июля объект находился в состоянии кометной активности, обусловленной значительным выбросом пыли с его поверхности. В §2.2.3 рассмотрена морфология изображений астероида. Анализ суммарных изображений, полученных 14 июля, подтвердил наличие у астероида слабой пылевой комы. Заключение о вероятной природе астероида (3552) Дон Кихот сделано в §2.2.4. С учетом имеющихся сведений, новых фотометрических данных, выявивших характер вспышечной активности, можно предположить, что с высокой вероятностью астероид в действительности является ядром угасшей кометы. Кроме того, выброс пыли и, как следствие, вспышка блеска, зарегистрированная 14 июля, свидетельствуют о столкновении объекта 3552 с другим небольшим объектом или бомбардировке его поверхности мелкими метеороидами. Глава 2 завершается выводами исследования в данном разделе.

Третья глава посвящена исследованию двойственного объекта 2008GO98 (362P) на основе его оптических наблюдений. В §3.1 приведены имеющиеся сведения о малоизученном объекте с двойным статусом, данные о его динамических свойствах и вспышечной активности, обстоятельства, вследствие которых он классифицируется как двойственный объект. Даны обстоятельства квазисинхронных наблюдений объекта в обсерваториях Санглох и Лесники (Украина), проведенных с целью уточнения его природы в 2017 г., нюансы астрометрической и фотометрической обработки изображений. Результаты наблюдений двойственного объекта 2008 GO98 (362P) приведены в последующих параграфах. В §3.2 исследуются динамические свойства, с высокой астрометрической точностью определены экваториальные координаты, на основе которых вычислена орбита и показано, что в период мониторинга, когда нами была зарегистрирована

вспышка объекта, его движение оставалось стабильным. Результаты определения физических свойств объекта 2008 GO98 (362P) приведены в §3.3. По нашим измерениям найден видимый и абсолютный блеск в полосе R, построена кривая блеска, а также оценен верхний предел диаметра. Новые фотометрические данные указывают, что в период мониторинга в июле 2017 г. объект находился в состоянии повышенной кометной активности, спад которой наблюдался в сентябре 2017 г. Наряду с этим, данные наблюдений объекта в октябре 2002 г. и в октябре 2018 г., когда его абсолютный блеск равнялся эфемеридной величине (Garsia-Migani, Gil-Hutton 2018, <https://www.minorplanetcenter.net> 2017) подтверждают, что объект периодически находится в неактивной стадии. Оценка размера по нашим измерениям соответствует имеющимся данным. В §3.4 оценен уровень кометной активности объекта. Измерен параметр пылепроизводительности и показано, что его величина постепенно снижается к концу мониторинга, что также указывает на ослабление кометной активности объекта 2008 GO98 (362P). В §3.5 проанализированы суммарные изображения объекта и выявлено наличие значительной пылевой комы вокруг ядра, зарегистрированной 18 и 30 июля. По изображениям, полученным 14 сентября, обнаружена намного более разреженная ослабленная пылевая кома. Это также подтверждает спад кометной активности объекта к концу наблюдений. В § 3.6. приведен анализ с целью установления природы двойственного объекта 2008 GO98 (362P). Показано, что вероятнее всего объект является ядром угасшей кометы, причинами наблюдаемой реактивации ядра могут быть ударный эффект или сублимационная активность, связанная с недавним прохождением перигелия (Бусарев и др. 2019).

Глава 3 завершается выводами исследования в данном разделе.

В Главе 4 приведены результаты фотометрических наблюдений комет 29P/Швассмана-Вахмана 1 и P/2019 LD2 (ATLAS). В §4.1 приведены имеющиеся сведения о комете 29P, включенную в группу

кентавров - объектов, имеющих двойственные свойства. Комета периодически проявляет вспышечную активность на больших гелиоцентрических расстояниях и в данном параграфе обсуждены возможные причины такой активности. Также даны обстоятельства многоцветных наблюдений кометы 29P в обсерватории Сангloch в период вспышечной активности в 2017 г. В §4.1.1 приведены результаты исследования физических свойств кометы 29P. Определен видимый и абсолютный блеск в фильтрах BVRI, построены кривые блеска и показано, что в период мониторинга у кометы зарегистрирована очередная вспышечная активность, постепенно спадавшая к концу наблюдений. Показатели цвета кометы 29P по нашим измерениям соответствуют средним показателям цвета активных объектов группы кентавров и объектов пояса Койпера (Jewitt 2015, Кохирова и др. 2018, Kokhirova et al. 2020). Выявленный сдвиг максимума излучения в красную часть спектра предполагает преобладающий вклад пылевых частиц в образование комы. Верхний предел эффективного диаметра ядра кометы 29P оценен как 43-46 км при альбедо $A=0.13$ (Lamy et al. 2004) и 87-91 км при $A=0.033$ (Cruikshank, Brown 1983, <https://cneos.jpl.nasa.gov>) наши оценки вполне соответствуют имеющимся данным. В §4.1.2 построены и проанализированы суммарные изображения кометы 29P. В результате в кометной коме выявлены две пылевые структуры. Морфология комы кометы 29P подтверждает возможность проявления активности у таких объектов на сравнительно больших гелиоцентрических расстояниях. В §4.1.3 даны обстоятельства многоцветных наблюдений кометы 29P в обсерватории Сангloch во время вспышки в 2021 г. В §4.1.3.1 приведены результаты определения видимого и абсолютного блеска, а также показателей цвета. В период мониторинга абсолютный блеск кометы имел тенденцию к снижению, показатель цвета (B-V) соответствует значению для активных объектов группы кентавров, величина (V-R) показывает, что в коме кометы усилен вклад пылевой компоненты. В §4.1.3.2 изучены морфологические особенности кометы в начале октября 2021 г., в

структуре комы кометы выявлены короткий хвост в антисолнечном направлении и два мощных джета в северном и южном направлениях, хвост и две активные области наблюдались в течение двух ночей. Снижение абсолютного блеска и более разреженная структура комы свидетельствуют о плавном спаде активности после 2 октября 2021 г. С учетом эфемеридной величины общей яркости кометы 8.6^m (CNEOS, <https://ssd.jpl.nasa.gov>, 2022) наши данные показывают более мощную по интенсивности вспышечную активность в 2021 г. по сравнению с 2017 г. Структура комы и характер вспышек схож с предыдущими явлениями, что подтверждает реальность механизма, ответственного за кометную активность на далеких гелиоцентрических расстояниях. В §4.1.4 рассмотрена возможная причина такой активности на больших гелиоцентрических расстояниях (Kokhirova et al. 2020) и показано, что с высокой вероятностью вспышки блеска связаны с интенсивным выбросом нейтрального газа CO с поверхности ядра кометы. Газ может высвобождаться в результате кристаллизации аморфного льда на поверхности ядра при соответствующем температурном режиме, который достигается на гелиоцентрических расстояниях порядка 5.828 а.е. Наши наблюдения проведены, когда комета находилась на гелиоцентрических расстояниях свыше 5.8 а.е. (2017 г.) и более 5.9 а.е. (2021 г.). Ранее выброс нейтрального CO был зарегистрирован по наблюдениям кометы 29P в субмиллиметровом диапазоне (Senay, Jewitt 1994). Выброс газа сопровождается пылеобразованием, что приводит к резкому увеличению блеска объекта, т.е. к вспышке.

В §4.2. приведены результаты фотометрических наблюдений кометы P/2019 LD2 (ATLAS). Сравнительно недавно открытая новая комета стала целью особого научного интереса, т.к. из-за динамических особенностей была отнесена к группе объектов, находящихся на стадии перехода от кентавров в кометы семейства Юпитера. Для исследования такой кометы крайне необходимы как можно больше наблюдательных данных и с этой целью выполнен мониторинг кометы в обсерватории Санглох в августе 2020

г. Здесь также даны обстоятельства наблюдений, детали фотометрической обработки изображений. Результаты определения физических свойств кометы P/2019 LD2 (ATLAS) приведены в §4.2.1. Измерены видимый и абсолютный блеск кометы, показано, что в период мониторинга блеск не подвергался значительным изменениям. Абсолютный блеск кометы по нашим измерениям составил 11.41 ± 0.03^m , его сопоставление с эфемеридной величиной 12.1^m указывает на повышенную кометную активность объекта в этот период. Построены изофоты кометы, демонстрирующие наличие комы вокруг ядра и типичного кометного хвоста, показано распределение яркости вдоль хвоста. Оценка верхнего предела диаметра кометного ядра на момент минимальной активности за период наблюдений (определенного по величине параметра пылепроизводительности) составила 14.8 км, что согласуется с размером, приведенным в различных базах данных. В §4.2.2. даны результаты определения параметра пылепроизводительности кометы P/2019 LD2 (ATLAS). Его величины находятся в интервале 230-272 см и свидетельствуют о повышенной активности кометы. Найдено распределение параметра пылепроизводительности в зависимости от радиуса апертуры по нашим наблюдениям. В §4.2.3 исследуется структура пылевого хвоста кометы P/2019 LD2 (ATLAS), а именно распределение пылевых частиц по размерам и по времени выброса с поверхности ядра. Для этого построены диаграммы Финсона-Пробстейна для внутреннего сектора хвоста и всей видимой части хвоста. Показано, что во внутренних областях пылевого хвоста доминируют крупные частицы пыли размером свыше 100 мкм. В §4.2.4 сделано предположение о происхождении кометы P/2019 LD2 (ATLAS).

Глава 4 завершается выводами исследования в данном разделе.

В **Заключении** кратко сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертации, и некоторые рекомендации для дальнейших исследований по теме диссертации.

Список литературы содержит все опубликованные источники, используемые в работе.

В **Приложении** приведен список сокращений, использованных в диссертации.

ГЛАВА I. ПОПУЛЯЦИЯ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Популяция малых тел Солнечной системы состоит из комет, астероидов и метеороидов. Приведем краткое описание объектов исследования согласно определениям, принятым Международным Астрономическим Союзом в 2015 г. (Borovicka J. 2016). Твердое тело диаметром свыше 1 метра, но менее размера карликовой планеты, двигающееся в межпланетном пространстве или поступающее из него и проявляющее активность в виде выделения газа, пыли или метеороидов, называется кометой. Астероидом принято называть прочное тело диаметром свыше 1 метра, но не превышающего размера карликовой планеты, двигающегося в межпланетном пространстве или поступающего из него и не проявляющего активности в виде выделения газа, пыли или метеороидов. Астероидом, сближающимся с Землей (АСЗ), называется малая планета, движущаяся по орбите, которая вследствие гравитационных возмущений может пересечь орбиту Земли. Перигелийные расстояния q орбит АСЗ удовлетворяют условию $q \leq 1.3$ а.е.

1.1. Семейства активных объектов среди астероидов и комет

Астероиды, или малые планеты, в основном сосредоточены между орбитами планет Марс и Юпитер. Эту область принято называть Главным поясом астероидов (ГПА). Главный пояс астероидов образуют твердые каменистые тела на гелиоцентрических расстояниях $2.1 < r < 3.2$ а.е. Размеры астероидов составляют от ~550 км до десятков метров. Первый астероид Церера открыт 1 января 1801 г. В настоящее время число известных астероидов составляет свыше 700 тыс. Из них 200 объектов имеют диаметры более 100 км. ГПА представляет собой уникальное образование в Солнечной системе, структура и физические состояние которого, несомненно, несут на себе отпечатки ее ранней истории. В связи с этим изучение астероидов может дать очень ценную информацию для решения космогонических вопросов не только самого пояса, но и Солнечной системы в целом. Именно с этим в

первую очередь связан большой интерес к астрофизическим исследованиям астероидов.

Согласно современным представлениям, астероиды могут быть «выжившими» остатками или фрагментами планетозимального вещества, из которого сформировались планеты земной группы. Следовательно, следы первичных химических и физических процессов все еще можно найти в астероидах (Hsieh, Jewitt 2009). Изучение астероидов обеспечивает получение информации о природе этой исконной материи, несмотря на то, что определенные процессы и внутренняя активность по-разному сказались на их эволюции. Наземные и космические наблюдения показывают популяцию астероидов как прочные тела, демонстрирующие широкий спектр химических и физических свойств, иными словами, одна из самых интересных характеристик астероидов – это их разнообразие (Jewitt 2012). Выявление причин такого разнообразия требует изучения большого количества тел. Информация о различных астероидах, собранная с помощью космических миссий в непосредственном контакте с ними, представляет собой мощный тест для калибровки методов, используемых при определении динамических, физических и химических свойств астероидов по наземным наблюдениям, которые являются и останутся основным источником данных об астероидах (Hsieh 2007). Таким образом, исследование каждого астероида и пояса астероидов в целом представляется одним из наиболее эффективных путей решения проблемы происхождения, формирования и эволюции всей Солнечной системы (Hsieh, Jewitt 2006).

Комета - это твердое тело,двигающееся в межпланетном пространстве и проявляющее активность в виде выделения газа и пыли. Согласно модели Уиппла (Whipple 1950, 1955), ядро кометы является конгломератом пылевых частиц, легкоплавких льдов и замерзших газов. Размеры кометных ядер заключены в интервале от 1 до десятков км. При приближении комет к Солнцу температура поверхности их ядра повышается, льды начинают нагреваться и испаряться, при этом потоки сублимирующих газов увлекают

за собой частицы пыли со скоростями не более 300 м/с (Whipple 1951, Ма 2002). Этот процесс приводит к образованию комы и характерных хвостов комет. Кометная активность проявляется при прохождении кометы вблизи перигелия и может длиться от одного до нескольких месяцев.

Образование и эволюция комет сопровождается множеством различных процессов, которые могут влиять на физические свойства ядер комет. Даже если предположить существование общего механизма формирования всех кометных ядер, то разнообразие должно сохраниться из-за различий в физических и химических условиях на разных гелиоцентрических расстояниях, на которых могли образоваться кометы (Лупишко и др. 2007). Поэтому, как и в случае с астероидами, кометы неоднородны по своим физическим свойствам, и существует необходимость исследовать как можно больше комет из различных семейств для получения всесторонней информации о них.

Кометы, как и астероиды, принято считать остатками вещества первоначальной и последующей стадий эпохи формирования Солнечной системы и изучая их, мы также познаем обстоятельства ранней и последующей истории Солнечной системы.

Для классификации малых тел во внутренней Солнечной системе существуют разные методы, подходы и критерии. Классическое понятие "астероиды" подразумевает, что это - неактивные объекты, состоящие в основном из нелетучего материала. В основном астероиды располагаются внутри орбиты Юпитера, где и сформировались. Принято считать, что кометы - это богатые льдом тела, сформированные на периферии Солнечной системы - в поясе Койпера или в облаке Орта (см., например, Jewitt 2015). Вследствие многочисленных гравитационных возмущений кометы из этих внешних регионов перебрасывались на орбиты, проходящие через внутреннюю Солнечную систему. Когда кометы приближаются к Солнцу, увеличивается нагрев поверхности их ядер, достаточный для того, чтобы произошел сублимационный процесс, который, в свою очередь, приводит к

выделению газов и пыли, формирующих кому вокруг ядра, хвосты и джеты позади или впереди движения кометы, соответственно (Бредихин 1954, Whipple 1950, 1951, 1955). Это явление называется нормальной кометной активностью.

Еще одним отличительным признаком комет и астероидов являются их динамические особенности. Для классификации типа орбит малых тел используются несколько критериев, среди которых наиболее широко применяется постоянная Тиссерана T_j (Kresak 1969). Она позволяет провести динамическое разделение между кометами и астероидами и определяется по отношению к Юпитеру следующим выражением (Kresak 1982, Kosai 1992)

$$T_j = \frac{a_j}{a} + 2 \left[\frac{a}{a_j} (1 - e^2) \right]^{0.5} \cos i, \quad (1.1)$$

где a , e , i – большая полуось, эксцентриситет и наклонение орбиты объекта, a_j – большая полуось орбиты Юпитера. Для комет T_j имеет значения менее 3 и для астероидов – свыше 3 (Kresak 1982, Jewitt 2012).

Однако за последние десятилетия выяснилось, что такое разделение комет и астероидов не столь однозначно, как подразумевалось ранее. В общепринятую классическую дефиницию не укладываются несколько групп объектов. Среди них т.н. «уснувшие» или «угасшие» кометы, имеющиеся среди астероидов, сближающихся с Землей (Opik 1963, Weissman et al. 1989, 2002, Бабаджанов, Кохирова 2009). Это ядра короткопериодических комет, которые в ходе эволюции потеряли все летучие или покрылись толстой тугоплавкой корой, полностью или временно предотвращающей сублимацию газов, и в период прохождения перигелия такие ядра уже не проявляют кометной активности. (Weissman et al. 2002) предложили следующие определения для описания существующих объектов кометной природы. Неактивной кометой называют ядро кометы, которая активна в некоторой части своей орбиты, но в настоящее время она находится в той части орбиты, где потери летучестей незначительны и нет видимой комы. Термином «спящая» комета обозначено ядро кометы, которая когда-то была активной и

потом утратила способность генерировать кому, видимую в любой части ее нынешней орбиты. «Спящая» комета может быть реактивирована, когда она перебрасывается вследствие возмущений на меньшее перигелийное расстояние. Или реактивация возможна, если в результате столкновения с другим телом или ударов метеоритов в покрывающей их мантии образуются трещины или отверстия, приводящие к взрыхлению поверхности и повреждению поверхностной тугоплавкой коры. Тогда свежие ледяные субстанции начинают сублимировать с поверхности, увлекая за собой пылевые частицы (Weissman et al. 2002).

Наблюдательные открытия и теоретические разработки за последние десятилетия привели к общему мнению о том, что, по крайней мере, некоторые астероиды, в частности, пересекающие орбиту Земли, на самом деле могут быть потухшими ядрами комет или их фрагментами. Угасшие ядра могут напоминать примитивные типы астероидов, такие как С, Р и D. Имеющиеся динамические оценки заключаются в том, что менее половины астероидов групп Аполлона и Атона могут быть угасшими ядрами комет, хотя неопределенность этой оценки довольно велика. Бабаджанов и Кохирова (2009) на основе вычисления эволюции орбит АСЗ и критерия выявления угасших комет по метеорному признаку показали, что среди АСЗ открытых до 2005 г. 5% составляют угасшие ядра комет. Совершенно очевидно, что для решения этих проблем необходимы дальнейшие подробные физические исследования АСЗ и других необычных астероидов.

В пользу реальности существования угасших ядер комет говорит и тот факт, что, как показали Емельяненко и др. (2013), средняя продолжительность активной фазы всех комет в области $q < 1.5$ а.е. составляет менее 200 оборотов, что значительно короче их динамического времени жизни в околоземном пространстве. Следовательно, можно ожидать, после завершения активной фазы кометы переходят в фазу астероидоподобных угасших (спящих) кометных ядер (Weissman et al. 2002). Внешне для наземного наблюдателя угасшие кометные ядра выглядят также как

астероиды, из-за чего различить их практически невозможно. Очевидным доказательством реальности таких объектов служит объект 107P/Вилсон-Харрингтон, открытый в 1949 году как активная комета, затем утерянный и вновь открытый в 1979 году как астероид, сближающийся с Землей (АСЗ), (4015) 1979 VA. Позже в 1992 году было подтверждено, что этот АСЗ в действительности является кометой 107P/Вилсон-Харрингтон, утратившей какие-либо признаки кометной активности (Bowell et al. 1992, Fernandez et al. 1997). Примером обратного хода событий служит комета 96P/Мачхолца 1, открытая в 1986 году. Специальные поиски этой кометы по вычисленным эфемеридам на пластинках, полученных на телескопах с большим полем зрения и предельной звёздной величиной до $+19^m$ до момента открытия кометы, не дали результата (Green et al. 1990). Хотя, по крайней мере три из четырех ее проходов перигелия были очень благоприятны для наблюдений (Sekanina 1990). Наиболее логичное объяснение этого факта заключается в предположении, что вплоть до 1986 года комета находилась в неактивном или «спящем» состоянии (Green et al. 1990, Sekanina 1990).

Другая группа малых тел, выходящих за рамки классического определения, это объекты переходного класса, расположенные в ГПА и названные «кометами Главного пояса» (КГП) (Hsieh, Jewitt 2006, Jewitt et al. 2009, Hsieh et al. 2009a,b) или «активными астероидами» (АА) (Jewitt 2012). Начало открытия нового класса объектов – комет Главного пояса было положено 14 июля 1996 г., когда у астероида ГП 7968 был обнаружен длинный пылевой хвост, вследствие чего он получил и кометное обозначение 133P/Эльст-Писарро.

Согласно имеющимся опубликованным данным, активность КГП связана с освобождением летучих соединений, находящихся в слое или под слоем реголита, а также со столкновениями с другими астероидами (Jewitt 2012; Jewitt et al. 2015, Neslusan et al. 2016, Kokhirova et al. 2018). Характерная особенность объектов этой группы заключается в том, что они обладают динамическими характеристиками астероидов - их орбиты

являются типично астероидальными с постоянной Тиссерана T_J больше 3, и в то же время они проявляют признаки атмосфер и активность, что свойственно кометам. Кометная активность выражается в появлении у них кометной комы с пылевыми или газовыми хвостами. Проявляемая ими кометная активность носит как периодический, так и единовременный характер. Несколько механизмов потери массы для 11 таких объектов были рассмотрены (Jewitt 2012), где они обозначены термином «активные астероиды», поскольку некоторые из этих тел не принадлежат Главному поясу астероидов (Jewitt et al. 2009, Hsieh et al. 2009a,b). Были предложены следующие механизмы ответственные за активность: метеоритная бомбардировка поверхности астероидов, нестабильность вращения, тепловые эффекты, вынос вещества за счет электростатических сил, сублимация летучих веществ (Jewitt 2012, Hsieh 2016, Neslusan et al. 2016). Кроме того, для некоторых примитивных астероидов ГПА на типично астероидных орбитах также подтверждена сублимационная активность во время прохождения перигелия (Busarev 2018; Бусарев и др. 2019).

В работе исследованы такие активные астероиды, как астероид ГПА (596) Шейла и астероид, сближающийся с Землей (АСЗ), (3552) Дон Кихот. Эти объекты относятся к группе активных астероидов благодаря проявленной кометной активности. При этом у астероида Шейла признаки кометной активности наблюдались один раз в 2010 г, а астероид Дон Кихот проявляет активность время от времени в течение последних нескольких лет.

Другими объектами Солнечной системы, которые возможно сочетают свойства и безатмосферных тел и комет, являются кентавры. Но динамические характеристики «угасших» комет и кентавров все же значительно отличаются от переходных объектов Главного пояса. Обнаружение кометной активности астероида (596) Шейла и других объектов подтверждает наличие переходного класса тел между астероидами и кометами (Larson 2010, Larson et al. 2010, Jewitt 2012, Jewitt et al. 2015). К настоящему моменту почти у 25 малых тел Солнечной системы известных

как астероиды наблюдалась кометная активность. (Jewitt 2012, Jewitt et al. 2015, Luu et al. 2021, Jewitt et al. 2021).

Итак, кентавры являются еще одним известным классом переходных объектов. Согласно классическому определению, кентавры - это небольшие ледяные тела, которые обращаются вокруг Солнца между орбитами Юпитера и Нептуна, при этом они либо пересекают орбиты одной или нескольких планет-гигантов, либо из-за неустойчивости орбит в этой области будут пересекать в будущем. По динамическим свойствам в группу кентавров относят объекты, у которых и перигелийное расстояние и большая полуось орбиты расположены между орбитами Юпитера – на гелиоцентрическом расстоянии 5.2 а.е. и Нептуна – на расстоянии 30 а.е. Кроме того, этим телам характерны хаотические орбиты (Bailey, Malhotra 2009). К настоящему моменту известны сотни кентавров, самыми известными из них являются (944) Идальго, (2060) Хирон, (54598) Биенор, (10199) Харикло, (60558) Эхекл и 166P/NEAT, кометы 39P/Отерма и 29P/Швассмана - Вахмана 1. Предполагается, что кентавры являются объектами, переброшенными из пояса Койпера во внутреннюю область планетной системы, где для наземных наблюдений они проявятся как короткопериодические кометы (Jewitt, Kalas 1998, Bailey, Malhotra 2009, Jewitt, Luu 1993, Levison, Duncan 1997, Jewitt et al. 1998). В этом смысле кентавры с научной точки зрения интересны как более яркие и доступные для изучения представители объектов пояса Койпера. В этом контексте в работе исследована комета 29P/Швассмана-Вахмана 1, являющаяся одним из самых известных объектов группы кентавров.

В данной работе еще одним предметом изучения является объект, имеющий из-за двойственности свойств и астероидное обозначение (457175) 2008 GO98 и кометное – 362P, т.н. объект с двойным статусом. На сегодня в базе данных MPC имеется порядка 10 таких объектов, имеющих и астероидное, и кометное обозначение (<http://www.minorplanetcenter.net>), и являющихся малоизученными. Комета P/2019 LD2 (ATLAS), отнесенная к

т.н. переходной группе, также исследована в диссертации. Первоначально объект был открыт как астероид, но позже проявил кометную активность и получил кометное обозначение. Комета P/2019 LD2 (ATLAS), находится на стадии перехода из группы кентавров в кометы семейства Юпитера (Sarid et al. 2019) и в этом контексте ее изучение способствует лучшему пониманию особенностей такого перехода.

Орбиты подавляющего большинства малых тел Солнечной системы расположены в областях, образующих Главный пояс астероидов, пояс Койпера и гипотетическое облако Оорта. Главный пояс астероидов и пояс Койпера имеют свои внутренние структуры (семейства астероидов, астероиды, сближающие с Землей, кентавры и т.д.), вызванные столкновительными процессами и возмущениями от больших планет. Чтобы лучше понять раннюю историю Солнечной системы, с научной точки зрения важно изучить кометы и астероиды, которые, как полагают, являются остатками от эпохи формирования. Значение КГП в том, что они, по-видимому, образуют третий резервуар комет в Солнечной системе (после облака Оорта и пояса Койпера) (Jewitt et al. 2009, Hsieh et al. 2009a,b). Сравнение объектов из трех резервуаров позволяет изучить протопланетный диск Солнца в трех областях: кометы (астероиды) Главного пояса, расположенные на расстоянии около 2.2-3.6 а.е. с температурой формирования $\sim 150\text{-}200\text{ K}$ в зависимости от расстояния от Солнца и свойств поверхности (Masiero et al. 2012); кометы пояса Койпера и кометное облако Оорта, сформированные, соответственно, на больших гелиоцентрических расстояниях и меньших равновесных температурах. Таким образом, определение динамических и физических характеристик КГП и объектов группы кентавров, установление достоверных механизмов внезапного появления кометной активности у астероидов, проявляющейся в виде выброса пыли и образования типичных кометных хвостов и выявление их связи с другими телами Солнечной системы является чрезвычайно актуальной задачей в настоящее время. Такие исследования относятся к

фундаментальной проблеме происхождения и взаимосвязи малых тел Солнечной системы

1.2. Оптические наблюдения активных объектов

Наблюдательная астрономия всегда была важным фактором развития астрономии и астрофизики. Оптическим наблюдениям принадлежит первостепенная и основополагающая роль в открытии активных малых тел Солнечной системы, классифицированных в новые семейства и группы, на исследования которых направлены усилия многих астрономов, в частности, настоящая диссертация также основана на результатах наблюдений и изучения активных объектов. С чего же все началось?

14 июля 1996 г. двумя наблюдателями E.W. Elst и G. Pizarro (обсерватория La Silla) открыт новый объект, находящийся в ГПА, который вращается по плоской почти круговой орбите, характерной для исконных астероидов, но в то же время у объекта был виден типичный для ледяных комет длинный пылевой хвост. Необычная комета главного пояса (7968) 133P/Elst-Pizarro, названная так по именам двух открывших ее астрономов и имеющая и астероидное обозначение 1996 N2, до недавнего времени была единственным объектом главного пояса астероидов, выглядевшим как комета, и имевшим загадочную природу. После открытия объект вновь проявил признаки кометной активности в 2002 г. Этим было положено начало открытию нового класса объектов, названных позже кометами главного пояса (Jewitt et al. 2015). В 1997 г. в группу таких объектов отнесена комета 107P/Уилсон-Харрингтон, прежде известная как астероид 1949 W1 вследствие обнаружения на фотопластинках, снятых в ноябре 1949 г. у объекта диффузного хвоста длиной около 2 угловых минут (Fernandez et al. 1997).

Следующее открытие произошло 26 ноября 2005 г., когда на 8-метровом телескопе Gemini North (обсерватория Мауна-Кеа) Hsieh & Jewitt (2006) обнаружили, что объект, известный как астероид 118401, имеет пылевой хвост, подобно кометам. На основе наблюдений астрономы сделали

вывод, что "астероид" 118401 (1999 RE70) относится к совершенно новому классу комет, к которому также принадлежат известная уже более 10 лет комета 133P/Elst-Pizarro (астероид 7968) и комета P/2005 U1, открытая в октябре 2005 г.

Далее с развитием техники наблюдений и усовершенствованием телескопов наблюдательная астрономия обусловила быстрый темп открытия активных малых тел. Объект P/2008 R1 наблюдался на интервале ~ 45 дней в 2008 г. и имел вид вспыхнувшей активной кометы с типичным хвостом (Jewitt et al. 2009). В 2010 г. Стив Ларсон из обсерватории Mount Lemmon обнаружил, что блеск астероида (596) Шейла увеличился почти в два раза и он, как комета, имел признаки комы. Позднее у этого объекта были обнаружены три хвоста. В этом же году у объекта P/2010 A2 (Linear) также наблюдалась сложная морфология пыли, не точечное ядро и пылевой хвост. Объект показал сложную морфологию: наблюдался протяженный хвост (или след) пыли, в который встроены лентообразные структуры (Jewitt et al. 2011). Объект 300163 (2006 VW139) обнаружен в 2006 г., в 2011 г. впервые показал кометную активность (Jewitt 2012), об этом объекте известно очень мало. Два тонких хвоста, один около проекции орбиты, а другой примерно антисолнечный, показывают, что пыль покидает ядро очень медленно и потеря массы происходит в течение длительного периода (Jewitt et al. 2015). Не имеется никаких доказательств наличия газа или повторяющейся потери массы, но новые наблюдения этого объекта пока не опубликованы. В сентябре 2012 г. объект P/2012 F5 (Gibbs) демонстрировал пылевой хвост на гелиоцентрическом расстоянии почти 3.1 а.е. Серия качественных изображений показала быстрое вращение ядра (период 3.24 часа) и выявила четыре сгущения в следе пыли, вытянутом по орбите. Динамический анализ объекта показал, что он стабилен как минимум в течение 1 млрд. лет, и поэтому маловероятно, что он захвачен из других областей Солнечной системы (Stevenson et al. 2012). Также установлено, что он является членом чрезвычайно компактного кластера астероидов с возрастом 1.5 ± 0.1 млн. лет

(Novakovic et al. 2014). В октябре 2013 г. наблюдения P/2013 R3 (Catalina-PANSTARRS) показали распад ядра кометы на несколько фрагментов, вследствие чего появились признаки кометной активности (Jewitt et al. 2015). 311P/PANSTARRS является объектом внутреннего пояса астероидов. Он выбрасывал пыль эпизодически на протяжении как минимум девяти месяцев 2013 г., создав замечательный мульти - хвост (Jewitt et al. 2015, Hainaut et al. 2014, Moreno et al. 2014). Эпизодическая потеря массы объектом отличается от той, что наблюдалась в любой ранее наблюдаемой комете, тем самым, причина активности не может быть объяснена процессами сублимации.

Открытие новых (или переоткрытие известных) активных объектов с помощью наземных оптических наблюдений продолжается и по настоящее время. Наблюдения проводятся в самых современных модернизированных обсерваториях, в том числе, с помощью 10.4-метрового Большого Канарского телескопа (GTC), 4.2-метрового телескопа Уильяма Гершеля (WHT), 3.56-метрового национального телескопа Галилео (TNG), 2.5-метрового телескопа Исаака Ньютона (INT) в обсерватории Эль-Роке-де-лос-Мучачос (Ла-Пальма, Испания) и др. Также наблюдения проводятся посредством 3.0-метрового инфракрасного телескопа НАСА (IRTF), расположенного в обсерватории Мауна-Кеа на Гавайях. Широкий фронт наблюдений за активными объектами и удаленными кометами выполнен и проводится с помощью 6-метрового телескопа САО РАН и 2-метрового телескопа Терскольской обсерватории ИНАСАН.

Подытоживая, отметим, что к настоящему моменту у более 25 малых тел Солнечной системы до этого известных как астероиды наблюдалась кометная активность. К суб-группе КГП относятся: 311P/PANSTARRS (P/2013 P5), P/2012 F5 (Gibbs), 259P/Garradd (P/2008 R1), 288P/(300163) 2006 VW139, P/2013 R3 (Catalina-PANSTARRS), 133P/(7968) Elst-Pizarro, 176P/(118401) LINEAR, 238P/Read (P/2005 U1), 324P/(2010 R2) La Sagra, 107P/(4015) Wilson-Harrington (Jewitt, 2012; Jewitt et al., 2016). В суб-группу активные астероиды включены: (3200) Phaethon, (596) Scheila, P/2010 A2

(LINEAR), (52872) Okyrhoe, (60558) 174P/Echeclus, (14827) Gipnos, (62412) 2000 SY178, (457175) 2008 GO98, (1) Ceres, (2201) Oljato (Jewitt 2012, Agarwal et al. 2013).

Наряду с активностью объектов групп КГП и АА имеются сведения об активности и примитивных астероидов ГПА, полученные на основе *UBVRI* - фотометрических, спектрофотометрических и поляриметрических наблюдений. В частности, в работах Busarev et al. (2015), Бусарев и др. (2016) представлены результаты, подтверждающие сублимационную активность у перигелия примитивных астероидов ГП 779 Нины, 704 Интерамнии и 145 Адеоны, обнаруженную впервые в сентябре 2012 г. Позже по новым наблюдениям Нины, Интерамнии и Адеоны, проведенных в 2016-2018 гг. при очередном прохождении этими астероидами перигелия, подтверждена их сублимационная активность и, кроме того, обнаружены вероятные спектральные признаки слабой сублимационной активности двух других примитивных астероидов ГП – 51 Немаузы и 65 Цибелы (Бусарев и др. 2018, Бусарев и др. 2019). Показано, что условия возникновения периодического и/или продолжительного сублимационного процесса на астероидах ГП с низкотемпературной минералогией очень вероятно связаны с их формированием вблизи «снеговой линии» или за ее пределами. Предположено, что общие эволюционные процессы могут поддерживать достаточно высокую концентрацию водяного льда вблизи поверхности рассматриваемых тел и, соответственно, – их длительную сублимационную активность, либо приводят к возобновлению угасшей активности (Бусарев и др. 2019).

Приведенные в предыдущем параграфе три системы классификации малых тел - наблюдательная, композиционная и динамическая независимы, но, как отмечено и несовершенны. В этом контексте, большое значение придается наблюдениям и используемой аппаратуре. Обнаружение комы или хвоста на данном объекте сильно зависит от параметров используемой оптической системы. Маленький телескоп не может обнаружить кому,

однако ее делает видимой более мощный телескоп. Кроме того, для выявления внезапной или эпизодической активности необходимы длительные и тщательные наблюдения.

Из приведенного обзора имеющихся сведений об активных объектах, накопленных и опубликованных к настоящему времени, а также по другим опубликованным источникам, включая авторитетные базы данных, становится очевидным, что их все еще недостаточно, чтобы выявить причины активности у каждого объекта из групп КПП, АА и других семейств, а также установить их истинную природу, происхождение и взаимосвязь с другими малыми телами. Поэтому оптические наблюдения активных тел крайне важны и необходимы для получения больших сведений о них.

Одним из основных направлений Института астрофизики Национальной академии наук Таджикистана является исследование малых тел Солнечной системы. Здесь имеются две современные астрономические обсерватории с прекрасным астрономическим климатом. Это Гиссарская астрономическая обсерватория (ГисАО, код MPC IAU 192) и Международная астрономическая обсерватория Санглох (МАОС, код MPC IAU 193). После восстановления и модернизации телескопа Цейсс-1000 в 2016 г. наблюдения в Международной астрономической обсерватории Санглох значительно активизировались. За последние пять лет в МАОС систематически наблюдают за активными объектами такими, как активные астероиды, кометы главного пояса, астероиды, сближающиеся с Землей, и ГПА, многие наблюдения выполняются совместно с зарубежными коллегами.

Наблюдения объектов исследования проведены на телескопе Цейсс-1000, астрономической обсерватории Санглох (МАОС) Института астрофизики НАНТ. Основные характеристики телескопа и матрицы ПЗС-камеры приведены в работе Кохирова и др. (2021). Фокусное расстояние телескопа (фокус Кассегрена) $F=13.3$ м, при этом масштаб получаемого изображения равен 63 мкм/угловых сек. Размер, и поле зрения матрицы

камеры составляют 4096×4096 пикселей и 11×11 угловых минут соответственно, масштаб матрицы (pixel scale) равен 0.18 угловых сек. на пиксель. Используются стандартные широкополосные фильтры международной фотометрической системы Джонсона-Козинса UBVRI, позволяющие выделить для наблюдений соответствующий диапазон спектра. Для уменьшения уровня шумов ПЗС камеры аппаратура охлаждается до температуры -20°C .

Часть наблюдений проведены с помощью 1.25-м телескопа АЗТ-11 Крымской астрофизической обсерватории Российской академии наук, снабженного ПЗС-камерой FLI 1024, характеристики телескопа и матрицы камеры приведены в работе (Киселев и др. 2014), а также в Астрономической обсерватории Киевского национального университета им. Т. Шевченко на телескопе АЗТ-8 (диаметр зеркала 70 см).

1.3. Методика астрометрической обработки

Измерение положений небесных объектов по их изображениям и определение их экваториальных координат являются основными задачами астрометрии.

Астрометрическая обработка и вычисление экваториальных координат объектов в ПЗС-кадре производится методами, принятыми в фотографической астрометрии (Gehrels 1985).

Согласно известным методам классической фотографической астрометрии экваториальные координаты объектов на кадрах определяются следующими уравнениями связи (Дейч 1973, Киселев 1989):

$$\begin{aligned}\xi &= f_1(x, y, a_1, b_1, c_1, \dots, p_1) \\ \eta &= f_2(x, y, a_2, b_2, c_2, \dots, p_2) .\end{aligned}\quad (1.2)$$

Уравнения (1.2) связывают измеренные на негативе прямоугольные координаты x, y и тангенциальные координаты ξ, η , которые являются функциями экваториальных координат α, δ . Они учитывают детальные свойства снимка, а также метод определения координат. Для определения положения одиночного объекта в центре кадра или нескольких объектов в

малом поле зрения достаточную точность обеспечивают линейные члены уравнений связи (метод шести постоянных или метод Тернера) (Медведев 2011):

$$\begin{aligned}\xi &= a_1x + b_1y + c_1, \\ \eta &= a_2x + b_2y + c_2.\end{aligned}\tag{1.3}$$

В результате измерений получается совокупность координат объектов в инструментальной прямоугольной системе координат, задаваемой направлениями, связанными со строками и столбцами ПЗС-матрицы. От этой системы осуществляется переход к сферической системе координат стандартными методами (Дейч 1973, Киселев 1989). Точность положений объектов в новой системе зависит от метода получения координат и от точности использованного каталога. Соответствие прямоугольных координат экваториальным координатам определяется свойствами оптики телескопа и ПЗС-камеры, и эта корреляция находится экспериментально для каждого отдельного ряда наблюдений.

С развитием современных информационных технологий создаются новые программы для автоматической обработки наблюдений. В настоящее время существует ряд программных пакетов для астрометрической обработки изображений небесных объектов. Приведем краткое описание программы, использованной для астрометрической обработки наблюдений, приведенных в диссертации.

Программный пакет АПЕКС-П был создан для астрометрической и фотометрической обработки астрономических наблюдений, получаемых с помощью ПЗС-камер (Девяткин и др. 2010). ПП АПЕКС-П позволяет проводить полностью автоматическую обработку, включающую калибровку ПЗС-изображений, детектирование объектов, измерение объектов, астрометрическую и фотометрическую обработку. Процесс астрометрической редукции состоит из нескольких этапов. Вначале координаты отождествленных опорных звезд каталога преобразуются в видимые и проецируются на плоскость кадра с учетом информации о типе

проекции, хранящейся в заголовке ПЗС-кадра. Для большинства координатно-временных преобразований и преобразований небесных координат в координаты кадра и обратно в пакете применяются соответствующие библиотеки (Девяткин и др. 2010). Затем по наборам x , y координат опорных звезд каталога и их измеренных координат на кадре определяются параметры модели редукции. В основном пакете АПЕКС-II имеются стандартные линейные и нелинейные модели редукции - модели 6, 8 и 10 постоянных и другие модели (Девяткин и др. 2010). Определенные методом наименьших квадратов параметры модели применяются затем к измеряемым объектам, и осуществляется обратное преобразование для получения координат объектов в системе опорного каталога (Девяткин и др. 2010).

Для практической реализации любого из перечисленных методов координаты небесного тела необходимо определять в системе выбранного каталога звезд. В ПП АПЕКС-II используются каталоги HIPPARCOS, TYCHO-2, USNO-A2, USNO-B1, UCAC3, UCAC4, UCAC5, 2MASS и APASS (AAVSO Photometric All-Sky Survey) (Девяткин и др. 2010). При этом точность координат звезд каталога HIPPARCOS составляет $0''.002$, каталога TYCHO-2 - почти $0''.013$ для звезд до 9^m и $0''.10$ для более слабых звезд, каталога USNO-A2 - $0.2''$. В последующем каталог USNO-A1.0 был заменён каталогом USNO-A2.0, который, в свою очередь, заменён каталогом USNO-B1.0 (David et al. 2003). Каталог звезд USNO-B1.0 обеспечивает покрытие всего неба с блеском вплоть до $V=21^m$, астрометрическую точность $0''.2$, фотометрическую точность 0.3^m в пяти стандартных широкополосных фильтрах и точность 85% для различения звезд от не звездных объектов. Каталог UCAC2 насчитывает 48000 звезд, распределенных по склонению в пределах $-90^\circ - +50^\circ$ для звезд $10-16^m$ с погрешностью положений $0.02-0''.07$ (Майгурова 2006). В каталоге UCAC4 приведены координаты более ярких звезд (от 10 до 14^m) с точностью около $0''.02$ и положения более слабых звезд (предельная величина 16^m) - с точностью около $0''.07$. Координаты звезд с

блеском 10^m - 14^m даны в каталог UCAC5 с астрометрической точностью приблизительно $0''.02$, тогда как точность положений более слабых звезд (до 16^m) составляет около $0''.07$. Точность координат звезд каталога 2MASS составляет около $0''.02$. В каталоге APASS блеск звезд сравнения приведен с точностью 0.03^m (Henden et al. 2018).

Точность наблюдений и их астрометрической обработки можно контролировать с использованием модуля программной системы ЭПОС (Львов, Цекмейстер 2012).

По измеренным в нескольких положениях координатам объектов можно построить их орбиту. Для этого существует много методов, которые применяются в зависимости от расположения измеренных точек на орбите и от того, какие возмущения учитываются. По небольшому количеству наблюдений строится первоначальная орбита, которая потом уточняется с помощью дополнительных новых наблюдений (Девяткин 2011, Медведев 2011).

Методы вычисления элементов орбиты небесного тела по небольшому числу наблюдений основаны на предположении, что движение этого объекта является невозмущенным кеплеровским - эллиптическим, гиперболическим или параболическим. Эфемеридная программа для объектов Солнечной системы (ЭПОС) является эффективным инструментом для исследования и эфемеридной поддержки наблюдений объектов Солнечной системы (Львов, Цекмейстер 2012). Программная система ЭПОС включает ряд компонентов. Основные из них это «Каталоги объектов», где содержатся данные элементов орбит и другие характеристики малых тел Солнечной системы (более 300 тыс. астероидов и более 2000 комет), включая самые последние данные из широко известных каталогов В. Marsden, Е. Bowell и др. Следующая подпрограмма «Эфемериды», которая вычисляет самые разнообразные по типу и точности эфемериды для наблюдений объектов Солнечной системы, а также для задач моделирования их движения. Еще один компонент «О-С»: Сравнение наблюдений и вычислений», здесь сравниваются наблюденные и

вычисленные положения и скорости объектов и др. (Львов, Цекмейстер 2012).

Подробное изложение методов определения орбит дано в работах Понтрягина (1961), Малкина (1956). Обзор методов содержится в монографии Дубошина (1976).

Астрометрическая обработка наблюдений активных объектов, проведенных в обсерватории Санглох, была выполнена с помощью ПП АПЕКС-II. В качестве опорных звезд использован астрометрический каталог UCAC5, для измерения положений на кадрах использовались опорные звезды с блеском, соответствующим указанному выше диапазону. Средняя по всем кадрам ошибка астрометрической редукции для прямого восхождения α и склонения δ объектов исследования будет приведена в соответствующих параграфах.

1.4. Методы фотометрической обработки

Определение звездных величин объекта и выявление их изменений является основной целью фотометрических измерений и обработки. Предельная звездная величина регистрируемых объектов находится по соотношению (Harris 1994):

$$m_{\text{lim}} = \mu + 2.5k \cdot \lg \frac{D\sqrt{Qt}}{(S/N)\Delta}, \quad (1.4)$$

где D - эффективный диаметр телескопа, Q - квантовая эффективность приемника, Δ - размер изображения звезды на матрице, t - время накопления, S/N - принятое значение отношения сигнала к шуму, μ - яркость фона неба. Фон неба выражается в звездных величинах с квадратной секунды дуги, D в метрах, Δ определяется стороной квадрата из целого числа пикселей, покрываемых изображением звезды, и выражается в секундах дуги, экспозиция выражается в секундах времени. Коэффициент k зависит от параметров установки и близок к 1.

В настоящее время для фотометрической обработки оптических наблюдений существует ряд программных пакетов, доступных и удобных

для использования. В них реализован алгоритм дифференциальной фотометрической редукции с привязкой к опорному каталогу (Девяткин, Горшанов 2010). Для этого, прежде всего, осуществляется автоматический выбор опорных звезд по различным критериям - по блеску, цвету, SNR и форме. Затем блеск опорных звезд приводится к инструментальной системе по эмпирическим формулам и используется совместно с измеренным блеском звезд для получения фотометрического решения. В качестве измеренного блеска при этом может использоваться апертурный, PSF (point spread function) или оптимальный поток. Фотометрическая модель имеет следующий полиномиальный вид

$$m' = m_0 + k_1 m + k_2 m^2 + \dots [+ kM(z)], \quad (1.5)$$

где m — измеренная звездная величина звезды на кадре, m' - звездная величина звезды по каталогу, приведенная к инструментальной системе, $M(z)$ - воздушная масса, m_0 , k_1 , - определяемые параметры модели, k - коэффициент экстинкции. В частном случае возможно использование модели нулевого порядка $m' = m_0 + m$, где определяемым параметром является только нуль-пункт m_0 . Использование последнего члена в формуле (1.5) может иметь смысл в больших полях зрения и на больших зенитных расстояниях, где существенную роль играет дифференциальная экстинкция. Далее полученная модель применяется к измеренному блеску исследуемых объектов для получения их блеска в системе каталога.

Стандартная первичная обработка изображений включает в себя создание мастер-кадров нулевой экспозиции, темнового и плоского полей, с помощью которых все кадры с изображением объекта были исправлены за нуль пункт и неравномерность чувствительности пикселей. Первичная обработка и сложение снимков проводилось с использованием программного обеспечения Astroart 4.0 (<http://www.msb-astroart.com/>, 2021). Фон неба определялся с помощью стандартной процедуры Sky пакета IDL (Landsman 1993). Для определения видимого блеска объектов были использованы звезды поля, которые предварительно исследовались на переменность.

Звездные величины звезд сравнения в полосах BVRI брались из каталога UCAC4, UCAC5, NOMAD1, NOMAD2, (<http://tdc-www.harvard.edu/catalogs/index.html>), APASS и APASS (DR9) (Henden et al. 2016). Для измерений изображений объектов и звезд поля использовались апертуры фиксированного радиуса от 3 до 7 угловых секунд, которые позволяла охватить объекты полностью (размеры проекций этих апертур на картинную плоскость объектов приведены в соответствующих параграфах). Остаточный фон неба оценивался при помощи кольцевой апертуры. Для апертурной фотометрии комет и опорных звезд использовалась утилита ATV под IDL для Windows (Barth 2001). При вычислении ошибки звездной величины суммировались статистические ошибки, которые обусловлены отношением сигнала к шуму S/N для объекта, звезд сравнения, ошибки каталожных звездных величин звезд-стандартов. В процессе обработки с помощью программ IDL ошибка для звезд сравнения при использовании каталогов UCAC 4 и NOMAD оказалась равной 0.02^m и 0.04^m соответственно. При использовании каталога APASS, блеск каталожных звезд определен с точностью 0.03^m и 0.07^m (Henden et al. 2016). В некоторых случаях для перехода от звездных величин в полосе r' (система Слоан) к величинам в полосе R_c (система Джонсона-Козинса) использовались формулы из Mallama (2014) и Munari et al. (2014). Таким методом был получен видимый блеск m и кривые видимого блеска объектов в BVRI полосах за каждую ночь наблюдений.

Фотометрическая обработка, включая первичную редукцию, наших наблюдательных данных выполнялась с помощью ПП АПЕКС-II и набора программ написанных под компьютерную систему программного обеспечения IDL (Interactive Data Language1) (<https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/IDL>). Детали ПП АПЕКС-II приведены выше, что касается утилит IDL, то они широко используются в научных и технических областях для обработки и анализа числовых и графических данных. Наиболее важное различие утилит IDL от

других ПП, используемых для анализа данных, заключается в том, что она действительно интерактивна. В среде IDL можно набрать команду и сразу увидеть результаты. Однако, несмотря на некоторые различия, оба программных обеспечения построены на реализации метода дифференциальной фотометрической редукции с привязкой к опорному каталогу (Девяткин, Горшанов 2010) описанному выше.

IDL, сокращение от Interactive Data Language, представляет собой язык программирования, используемый для анализа данных. Он популярен в определенных областях науки, таких как астрономия, физика атмосферы и получение медицинских изображений. IDL является векторизованным, числовым и интерактивным, и обычно используется для интерактивной обработки больших объемов данных (включая обработку изображений). Как и большинство других языков программирования массивов, IDL очень быстро выполняет векторные операции. Следовательно, для числовых вычислений в языке используется встроенные векторные операции. IDL широко применяется в космической науке и астрофизике. Европейское космическое агентство использовало IDL для обработки почти всех снимков кометы Галлея, сделанных космическим кораблем Джотто. В настоящее время, среди других приложений, IDL используется для большей части анализа части SECCHI миссии STEREO (<https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/IDL>).

Конвертация измеренного видимого блеска объекта в каком-либо фильтре в его абсолютное значение осуществлялось по известным эмпирическим соотношениям, причем эти формулы различны для астероидов и комет. Более подробно это будет изложено в соответствующих параграфах.

Фотометрическая обработка позволила получить ряд ценных данных таких, как показатели цвета, период вращения, оценка диаметра, пылепроизводительность, морфология изображений объектов, структура хвоста и др., которые будут представлены в следующих разделах диссертации. Отметим, что для комет точность измерения звездных величин

ядра зависит от гелиоцентрического расстояния кометы, чем ближе комета к Солнцу, тем труднее измерить блеск ее ядра из-за наличия комы. Поэтому в таких случаях можно говорить об измерении лишь фотометрического диаметра ядра кометы. Более точные оценки диаметра ядра можно получить из наблюдений комет на больших гелиоцентрических расстояниях, когда отсутствуют признаки ее активности.

Выводы по главе I

Приведен обзор, содержащий определение и характеристику малых тел Солнечной системы. Показано, что наряду с двумя основными классами малых тел – астероидами и кометами в настоящее время имеется несколько семейств, объекты которых совмещают признаки, как комет, так и астероидов. Существование таких объектов, подтвержденное наблюдательными фактами, указывает на то, что традиционное разделение комет и астероидов не столь однозначно, как подразумевалось ранее, и в действительности они более, чем предполагалось, близки друг к другу. Приведено текущее состояние дел в исследованиях следующих семейств активных малых тел: активные астероиды, кометы Главного пояса, активные объекты группы кентавров, угасшие ядра комет, вновь проявившие активность, объекты на стадии перехода из группы кентавров в кометы семейства Юпитера, объекты с двойным статусом. Основная цель их дальнейшего изучения – это накопление большего наблюдательного материала по каждому из объектов, и определение их свойств для установления природы, и происхождения. Приведено краткое описание методов астрометрической и фотометрической обработки изображений, используемых в диссертации. Результаты астрометрии с использованием рассмотренного программного обеспечения свидетельствуют об их приемлемой точности и соответствии требованиям и критериям к качеству астрометрии, принятых в международных базах данных. Результаты фотометрической редукции наблюдений, а именно, найденный видимый и абсолютный блеск объектов в период наблюдений, крайне необходимы для

определения физических свойств активных малых тел. При этом методы и подходы нахождения физических свойств астероидов и комет в силу различий между ними, приведенных в Главе 1, различаются.

ГЛАВА II. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНЫХ АСТЕРОИДОВ (596) ШЕЙЛА И (3552) ДОН КИХОТ

2.1 Исследование вспышечной активности астероида (596) Шейла

Астероид ГПА (596) Шейла был обнаружен на фотографических пластинках 21 февраля 1906 г. А. Копфом из Гейдельберга. Основные орбитальные и физические характеристики астероида приведены в табл. 2.1, где a – большая полуось, q , Q – перигелийное и афелийное расстояния, e – эксцентриситет, i – наклонение, ω – аргумент перигелия, Ω – долгота восходящего узла, T_j – критерий Тиссерана, значение которого указывает на типично астероидную орбиту объекта, P – период обращения.

11 декабря 2010 г. во время наблюдений в обсерватории Маунт-Леммон в рамках Каталинского небесного обзора (Аризона, США) было обнаружено, что блеск астероида Шейла увеличился почти в два раза и у него, как у кометы, образовалась кома, и затем появились три пылевых хвоста (Larson 2010, Larson et al. 2010). Изображение астероида (596) Шейла, полученное в период вспышки в декабре 2010 г. на 152.4 см телескопе Каталинского небесного обзора приведено на рис.2.1 (авторы А.Гиббс и С.Ларсон, кредит <https://uanews.arizona.edu>). Снимок получен на основе суммирования 30 кадров с изображением астероида.

Таблица 2.1. Основные параметры астероида (596) Шейла*

Орбитальные характеристики (J2000.0)		Физические характеристики	
Эпоха:	22.09.2017	Абсолютный блеск H	8.9 зв. вел.
a	2.927 а.е.	Видимый блеск m	11.7-15.3 зв. вел.
q	2.449 а.е.	Диаметр D	159.7±1.1 км (Masiero et al. 2012)
Q	3.406 а.е.	Период вращения p	15.848 час.
e	0.163	Геометрическое альbedo p_v	0.038±0.004 (Tedesco, Desert 2002)
i	14.661 град.	Показатель цвета $B-V$	0.714 зв. вел.

ω	175.157 град.	Показатель цвета $U-B$	0.177 зв. вел.
Ω	70.606 град.	P	5.01 года
T_j	3.209	-	-

*Все параметры табл.2.1, за исключением величин, снабженных отдельными ссылками, даны согласно базе данных НАСА (<http://ssd.jpl.nasa.gov>, 2017).



Рис. 2.1. Суммированное изображение астероида (596) Шейла в период вспышки в декабре 2010 г. (Alex Gibbs и Steve Larson, кредит <https://uanews.arizona.edu>).

Из-за проявления признаков кометной активности объект был отнесен к группе активных астероидов. Зафиксированная кометная активность, не свойственная астероидам, сразу привлекла большое внимание к объекту. Исследования астероида проводились по наблюдениям космического аппарата Swift UV (Bodewits et al. 2011) и космического телескопа Хаббл (Jewitt et al. 2011), а также по наземным наблюдениям (см., например, Betzler et al. 2012, Киселев и др. 2014, Neslushan et al. 2016, Кохирова и др. 2018). В спектре астероида обнаружено значительное покраснение в ультрафиолетовой области. Измерения показали, что вспышка астероида имела эпизодический характер и не связана с выделением газов характерных для комет CO, CO₂⁺, OH, NH, CN, C₂, C₃ (Bodewits et al. 2011). Показано, что из астероида было выброшено 6×10^8 кг пыли со скоростью 57 м/с. Уже в 2011

г. в качестве причины проявленной активности астероида Шейла было предположено столкновение с другим космическим телом (Jewitt et al. 2011, Bodewits et al. 2011).

По наземным наблюдениям в декабре 2010 г.- мае 2011 г. было показано, что морфология вспышки астероида изменилась за этот период наблюдений, получены оценки диаметра, и массы выброшенной пыли; а также предположено, что причиной вспышки могло быть столкновение с крупным метеороидом, принадлежащим метеороидным роям, связанными с двумя периодическими кометами 127P и P/2005K3, вблизи орбит, которых астероид прошел незадолго до вспышки (Neslushan et al. 2016).

В следующих параграфах приведены результаты наблюдений астероида Шейла в 2011 г. и 2017 г., подтверждающие, что астероид в эти периоды продолжал сохранять видимое и абсолютное значение блеска, и другие динамические и физические свойства, следовательно, столкновение с малым телом в декабре 2010 г. не привело к значительным разрушениям объекта (Киселев и др. 2014, Кохирова и др. 2018).

2.1.1. Результаты фотометрических наблюдений астероида

(596) Шейла в 2011 году

С целью поиска новых признаков активности и выявления ее причин на 1.25 м телескопе АЗТ-11, снабженного ПЗС камерой FLI 1024, в Крымской астрофизической обсерватории с 30 мая по 4 июня 2011 г. были проведены многоцветные фотометрические наблюдения астероида (596) Шейла. Поле зрения камеры составляет 8x8 угловых минут. Использовались стандартные широкополосные *BVRI* фильтры фотометрической системы Джонсона-Козинса, позволяющие выделить соответствующий диапазон спектра при наблюдениях. Даты и время наблюдений астероида в долях суток мирового времени, количество полученных изображений, а также гео- и гелиоцентрические расстояния астероида приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Журнал наблюдений астероида (596) Шейла в 2011 г.

Дата и время наблюдений, 2011г.	Количество кадров	r , а.е.	Δ , а.е.
Май 30.852-30.896	49	2.837	3.026
Май 31.798-31.812	21	2.833	3.036
Июнь 1.799-1.849	82	2.832	3.046
Июнь 3.799-3.880	92	2.829	3.067

Мы использовали экспозиции 120, 60, 30 и 30 с для *BVRI* фильтров соответственно. Фотометрическая обработка наблюдательных данных проводилась с помощью стандартной программы Maxim DL 5. Первичная обработка заключалась в учете шумов считывания матрицы, темнового тока и плоских полей. Астероид достаточно быстро перемещался от ночи к ночи, поэтому на кадрах, полученных в разные ночи, выбирались разные звезды сравнения. Координаты и видимые звездные величины использованных опорных звезд приведены в табл.2.3, где α – прямое восхождение и δ – склонение звезды.

Таблица 2.3. Координаты и видимый блеск звезд сравнения

Дата наблюдений 2011 г.	№ звезды	Координаты звезд (2000.0)		V , зв.вел.
		α	δ	
май 30	1	09h 40m 3.5s	28° 32'26"	12.5
	2	09h 40m 23.4s	28° 29'43"	14.6
май 31	1	09h 41m 5.4s	28°24'40"	11.8
	2	09h 41m 21.5s	28° 18'23"	12.7
июнь 1	1	09h 42m 36.1s	28° 06'35"	14.3
	2	09h 42m 41.2s	28° 12'20"	12.3
июнь 3	1	09h 44m 53.1s	27° 52'31"	13.6
	2	09h 44m 45.8s	27° 53'43"	14.3
	3	09h 44m 36.6s	27° 51'12"	14.3

К сожалению, из-за отсутствия благоприятных фотометрических условий во время наблюдений, нам не удалось привязать блеск использованных звезд сравнения к фотометрическим стандартам. Поэтому мы приводим результаты фотометрических наблюдений астероида лишь в полосе V (видимый диапазон спектра) с учетом видимых значений блеска использованных звезд.

Составная кривая блеска астероида, вычисленная с периодом 15.848 ч. приведена на рис. 2.2. Фазы осевого вращения вычислены относительно первоначального момента эпохи JD2457700.0. Данные, полученные в разные ночи, отмечены различными символами. Как видно из рис. 2.2, данные за три ночи наблюдений попали на близкие фазы периода вращения в интервале 0.5-0.6. По этой причине трудно сделать заключение о полной амплитуде изменения блеска астероида. Однако по нашим данным можно сделать вывод, что колебания блеска не превосходили 0.1 звездной величины. Средний видимый блеск астероида $V=14.64\pm0.10$ звездной величины, полученный по нашим наблюдениям, близок к эфемеридному значению 14.6 звездной величины. Это свидетельствует о том, что абсолютный блеск астероида 8.9 звездной величины, который он имел до столкновения с малым телом, сохранил свое значение и в период данных наблюдений. Следовательно, столкновение с малым телом в декабре 2010 г. не привело к значительным разрушениям объекта (Киселев и др. 2014).

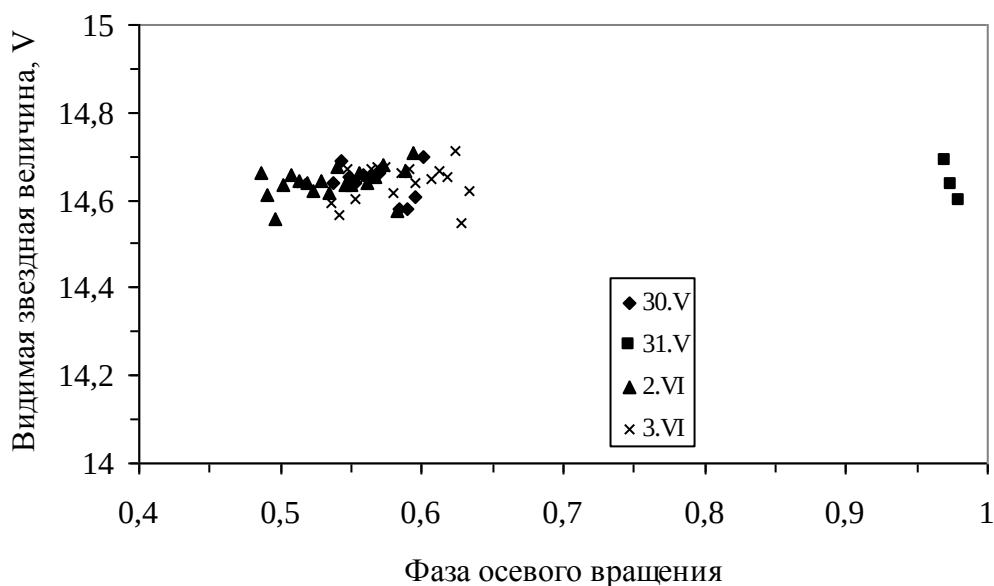


Рис. 2.2. Зависимость блеска в полосе V астероида (596) Шейла от фазы осевого вращения.

2.1.2. Результаты наблюдений астероида (596) Шейла в 2017 году

Целью новых наблюдений астероида (596) Шейла в 2017 г. является продолжение анализа динамических свойств – координат и орбиты, и фотометрических характеристик астероида – блеска и вида кривой блеска, показателей цвета, размера, периода вращения, и выявление возможных их изменений, которые могли произойти в результате столкновения.

Астрометрические и фотометрические наблюдения астероида Шейла проведены на телескопе Цейсс-1000 в Международной астрономической обсерватории Санглох (МАОС) Института астрофизики НАНТ, снабженного ПЗС камерой FLI Proline PL16803, 16-17 июня и 30 июля-1 августа 2017 г. Фокусное расстояние телескопа (фокус Кассегрена) $F=13.3$ м, при этом масштаб получаемого изображения равен 63 мкм/угловых сек. Размер, и поле зрения матрицы камеры составляют 4096×4096 пикселей и 11×11 угловых минут соответственно, масштаб матрицы (pixel scale) равен 0.18 угловых сек. на пиксель. Для уменьшения избыточности информации и повышения отношения сигнал/шум (S/N) изображения сохранялись с учетом значения

биннинга 2, поэтому рабочий масштаб изображений составляет 0.36 угловых сек. на пиксель. Качество изображений, которое было измерено как среднее значение FWHM нескольких звезд с отдельных кадров, было на уровне 2.1 угловых сек. Использовались стандартные BVRI фильтры, достаточно близко реализующие полосы фотометрической системы Джонсона-Козинса. Для уменьшения уровня шумов ПЗС матрицы она была охлаждена до температуры -20°C . Для учета темнового сигнала использованы кадры «Dark», для выравнивания полей изображений использованы кадры «Flat», для учета ошибок матрицы ПЗС-камеры снимались кадры «Bias», которые также использовались в обработке кадров. За весь период наблюдений получено 550 кадров с экспозициями 10 и 60 с. Для абсолютизации фотометрических измерений брались все звезды поля, которые предварительно исследовались на наличие переменности. Для фотометрических исследований использовался фотометрический каталог APASS (<https://www.aavso.org/apass>). Каталог APASS содержит звезды со звездными величинами в интервале 7^{m} - 17^{m} , измеренными в пяти полосах пропускания: B, V (система Джонсона-Козинса) и g' , r' , i' (система Слоан). Для перехода от системы Слоан к системе Джонсона-Козинса для полосы R были взяты уравнения перехода из работы Mallama (2014). Мы использовали для обработки изображений, а также расчета фона неба программы, составленные на программном языке IDL (<https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/IDL>).

Снимок астероида Шейла приведен на рис.2.3 (а). Для измерений изображений астероида и звезд поля использовалась апертура фиксированного радиуса, которая позволила охватить объект полностью. На рис. 2.3 (б) представлена зависимость величины S/N (отношение сигнал/шум) астероида и звезды стандарта от даты наблюдений, для изображений, полученных в R фильтре. Даты и время наблюдений астероида в долях суток мирового времени, количество полученных изображений N , время

экспозиции t , а также гео- и гелиоцентрические расстояния r , Δ , и фазовый угол ph астероида приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4. Журнал наблюдений астероида (596) Шейла в обсерватории Санглох

Дата, UT	r , а.е.	Δ , а.е.	ph , град.	t , c	N			
					B	V	R	I
Июнь 16.85 2017	2.452	1.473	8.2	10	43		42	
Июнь 17.73 2017	2.453	1.478	8.6	10	100			
Июль 30.69 2017	2.470	1.849	21.7	60	36	35	40	35
Июль 31.71 2017	2.471	1.861	21.8	60	13			
Август 01.72 2017	2.471	1.873	21.9	60	20			

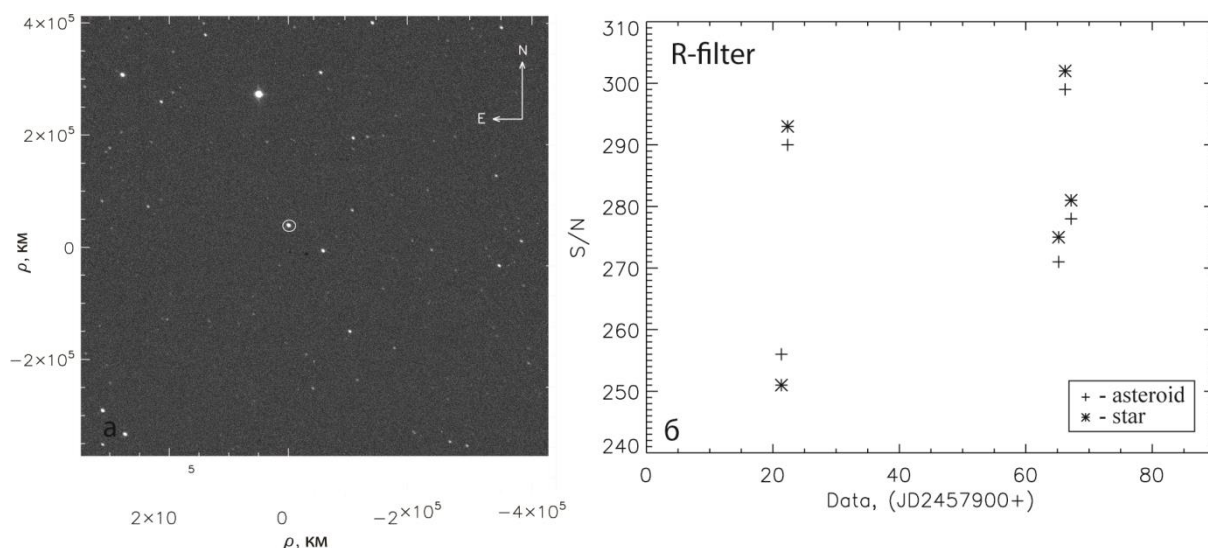


Рис.2.3. Изображение астероида (596) Шейла в фильтре R , полученное в обсерватории Санглох 16 июня 2017 г (а) и отношение S/N для астероида и звезды стандарта для всего периода наблюдений (для изображений, полученных в фильтре R) (б).

2.1.3. Определение координат и орбиты

Астрометрическая обработка наблюдений, проведенных в МАОС 30.07-1.08.2017 г., была выполнена с помощью программного пакета АПЕКС-II, разработанного в Пулковской обсерватории (Девяткин и др.

2010). Программа выполняет калибровку кадров, идентификацию изображений звёзд и объектов, и отождествление звёзд с заданными каталогами. В процессе астрометрической редукции учет искажений изображений, которые производит оптическая система, выполняется методами шести или восьми постоянных (в зависимости от числа отождествлённых звёзд). В качестве опорного использован астрометрический каталог UCAC4. Точность координат звезд с блеском в интервале от 10^m до 14^m приведены в UCAC4 с астрометрической точностью около $0.02''$, положения более слабых звезд (предельная величина 16^m) даны с точностью около $0.07''$. Для измерений положений на кадрах использовались опорные звезды с блеском, соответствующему указанному интервалу. Средняя по всем кадрам ошибка астрометрической редукции составляет $0.323''$ и $0.190''$ для прямого восхождения α и склонения δ , соответственно. В табл.2.5 представлены средние значения отклонений измеренных экваториальных координат (O) от каталожных данных (C), обозначенные как $(O-C)_\alpha$ и $(O-C)_\delta$ для координат α и δ , соответственно, а также их средние квадратичные ошибки σ_α и σ_δ по наблюдениям в МАОС 30.07-1.08.2017 г. Результаты определения координат астероида по наблюдениям в МАОС приведены на рис.2.4, где по оси абсцисс даны α – прямое восхождение и по оси ординат δ – склонение астероида (<http://www.minorplanetcenter.net/iau>, M.P.C. 808122, 2017).

Используя измеренные координаты астероида в нескольких положениях можно построить его орбиту. Для этого существует много методов, которые применяются в зависимости от расположения измеренных точек на орбите и от того, какие возмущения учитываются. По небольшому количеству наблюдений строится первоначальная орбита, которая потом уточняется с помощью дополнительных новых наблюдений. Определение орбиты астероида Шейла выполнялось с использованием ПП ЭПОС, созданного также в Пулковской обсерватории (Львов, Цекмейстер 2012). Для среднего момента наблюдений МАОС с использованием 208 наблюдений

удалось получить первоначальную орбиту астероида, приведенную в табл. 2.6. Здесь даны следующие элементы орбиты в равноденствии 2000.0: e — эксцентриситет, a — большая полуось, q — перигелийное расстояние, i — наклонение, ω — аргумент перигелия, Ω — долгота восходящего узла, n — среднее суточное движение, σ — средняя квадратичная ошибка. Для сравнения в табл.2.6. приведена орбита, вычисленная на основе свыше 3700 наблюдений астероида в различных обсерваториях с 1906 по 2017 гг. согласно базе данных MPC (<http://www.minorplanetcenter.net/iau>, М.Р.С. 421631, 2017) и в последнем столбце показана разность между данными.

Таблица 2.5. Средние разности (O-C) и их стандартные отклонения для астероида (596) Шейла

Дата	$(O-C)_\alpha$	σ_α	$(O-C)_\delta$	σ_δ
30.07. 2017	-0.038"	0.026"	-0.016"	0.043"
31.07. 2017	-0.027	0.062	-0.003	0.048
01.08. 2017	-0.038	0.018	-0.043	0.021

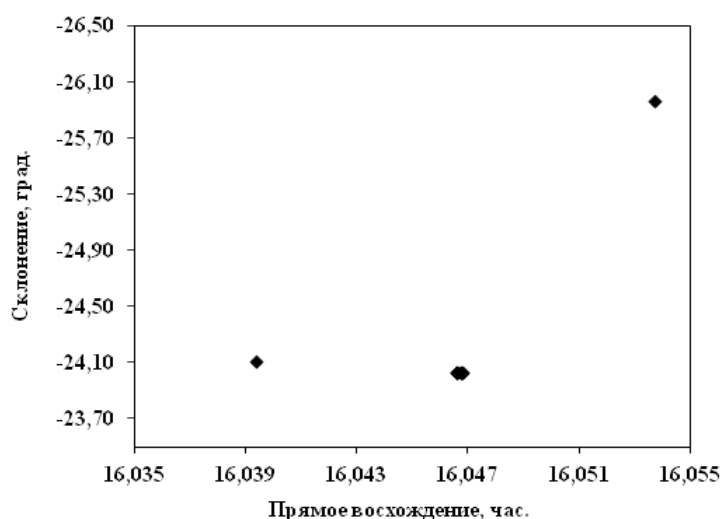


Рис.2.4. Видимая траектория астероида (596) Шейла по наблюдениям на Санглохе 30.07-1.08. 2017 г.

Таблица 2.6. Сравнение первоначальной орбиты астероида (596) Шейла, полученной по наблюдениям обсерватории Санглов, и орбиты MPC (J2000.0)

Элементы орбиты	MAOC [данная работа]	MPC	Σ
Кол-во положений, использованное для вычисления орбиты	208	3758	-
T	JD 2458716.1	JD 2457892.4	-
Эпоха	2457979.5	2458000.5	-
e	0.16354	0.16348	-0.00006
a, а.е.	2.92821	2.92761	-0.00060
q, а.е.	2.44932	2.44898	-0.00034
i, град.	14.66023	14.66149	0.00126
ω , град.	70.60387	70.60631	0.00244
Ω , град.	175.27739	175.15669	-0.12070
n, град./сут.	0.19670	0.19676	0.00006
σ	0".462	0".356	-

2.1.4. Определение видимых и абсолютных звездных величин, показателей цвета и оценка диаметра астероида (596) Шейла

Для стандартной обработки фотометрических изображений были созданы мастер-кадры нулевой экспозиции, темнового и плоского полей. Все кадры с изображением астероида были исправлены за нуль пункт и неравномерность чувствительности пикселей с помощью мастер-кадров. Фон неба был определен с помощью стандартной процедуры Sky пакета IDL (Landsman 1993). Для апертурной фотометрии звезд использовалась диафрагма радиусом 7 угловых сек. ($3 \times \text{FWHM}$). Остаточный фон неба

оценивался при помощи кольцевой апертуры. При вычислении ошибки звездной величины суммировались статистические ошибки, которые обусловлены отношением S/N для объекта, звезд сравнения, ошибки каталожных звездных величин звезд-стандартов (в случае использования каталога APASS ошибка для звезд сравнения принималась равной 0.03^m (Henden et al. 2011).

Полученные таким образом средние значения видимых звездных величин объекта, полученные в разных фильтрах, даны в табл. 2.7. Кривые блеска астероида Шейла, представлены на рис.2.5, где по оси ординат отложены видимые звездные величины m и по оси абсцисс - даты наблюдений в юлианских днях.

Таблица 2.7. Видимый блеск (зв. вел. *) астероида (596) Шейла по наблюдениям в обсерватории Санглох в 2017 г.

Фильтр	16.06	17.06	30.07	31.07	1.08
B	12.91±0.04	12.92±0.04	13.94±0.04	13.98±0.04	13.95±0.04
V	12.24±0.03	12.19±0.03	13.22±0.03	13.27±0.03	13.24±0.03
R	11.95±0.03	11.91±0.03	12.93±0.03	12.96±0.03	12.95±0.03
I	11.63±0.03	11.60±0.03	12.61±0.03	12.65±0.03	12.63±0.03

*оценка звездной величины в апертурном радиусе (размер апертуры 7 угловых сек., что соответствует 2692.21 км).

Как видно из рис. 2.5 и табл.2.7, блеск астероида практически не изменяется, его колебания почти не превосходили 0.1 звездной величины. Однако здесь не учтены фазы периода вращения объекта, охваченные нашим мониторингом, и по этой причине трудно сделать заключение о полной амплитуде изменения блеска астероида. Видимый блеск за весь период наблюдений постепенно снижался, т.к. астероид удалялся и от Солнца, и от наблюдателя, но, как будет показано ниже, абсолютный блеск варьировал вблизи эфемеридного значения в пределах ошибок измерений.

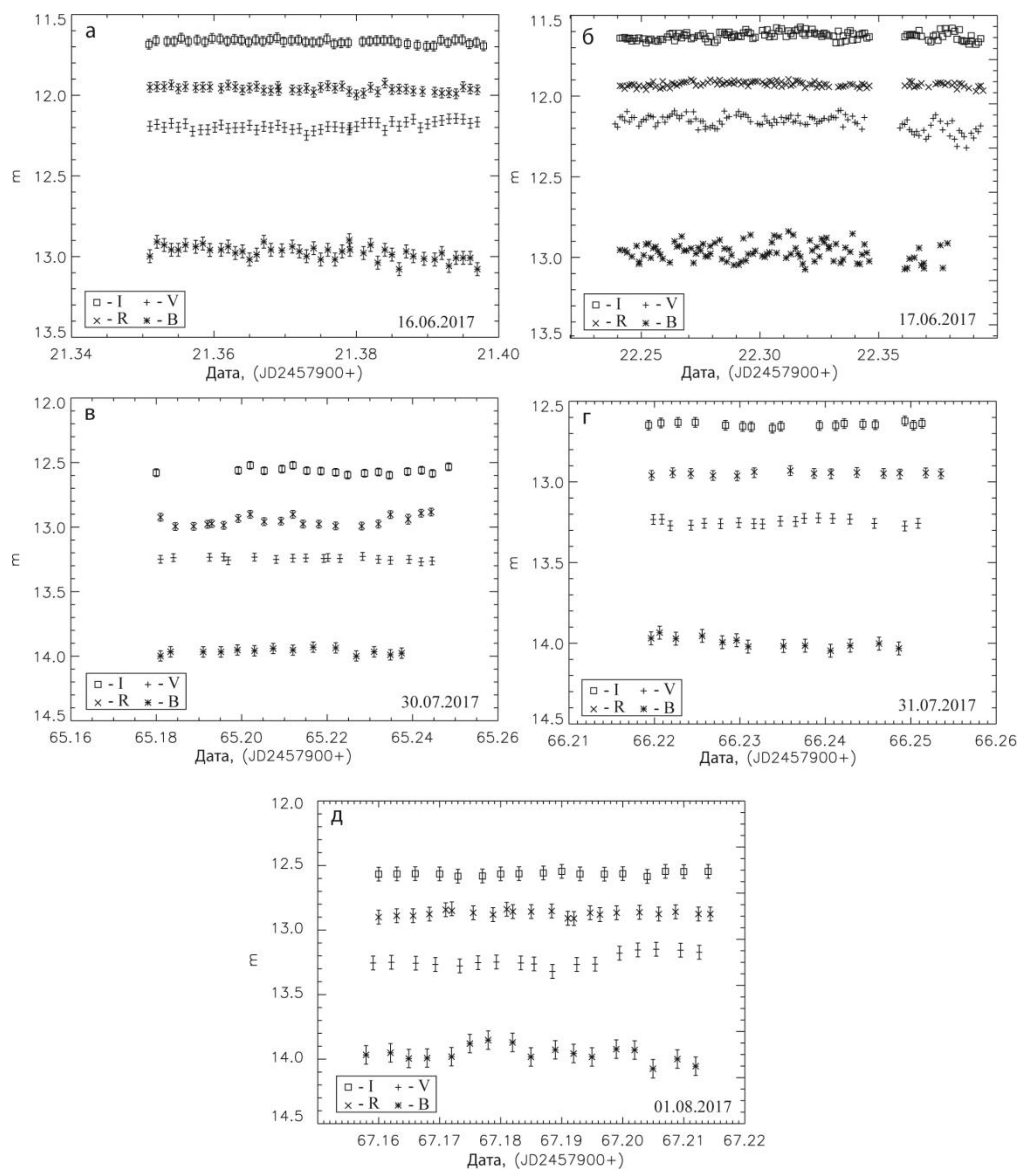


Рис. 2.5. Кривые блеска астероида (596) Шейла в фильтрах BVRI по наблюдениям в обсерватории Сангloch 16-17 июня (а, б), 30 июля–1 августа (в, г, д) 2017 г.

Видимые звездные величины m конвертировались в абсолютные величины H по следующей полуэмпирической формуле (Bowell et al. 1989), позволяющей более точно описать изменение блеска астероида в диапазоне фазовых углов от 0 до 120 град.:

$$H = m - 5 \log(r\Delta) + 2.5 \log[(1 - G)\Phi_1 + G\Phi_2], \quad (2.1)$$

$$\Phi_i = \exp\left[-A_i \{ \lg(\beta/2) \}^{B_i}\right] i = 1, 2,$$

где G – параметр наклона, найденный лишь для небольшого числа астероидов, для остальных принято значение $G=0.15$; Φ_1 , Φ_2 – функции угла

фазы, $A_1=3.33$, $A_2=1.87$, $B_1=0.63$ и $B_2=1.22$ – коэффициенты, значения которых приведены в Penttila et al. (2016). Найденный таким путем абсолютный блеск астероида в фильтрах V и R - H_V , H_R (средние значения за ночь), а также видимый блеск в этих фильтрах m_V , m_R приведены в табл. 2.8. Здесь также даны гео- и гелиоцентрические расстояния r , Δ , и фазовый угол ph астероида. Полученные абсолютные значения варьируются от 9.0 ± 0.05 до 8.8 ± 0.03 зв. вел. в фильтре V и R , соответственно.

Для определения диаметра астероида Шейла D (в км) использовано следующее эмпирическое соотношение, принятое для оценки размера астероидов (Harris 2002):

$$D = \frac{1329}{\sqrt{p_v} \cdot 10^{0.2H}} , \quad (2.2)$$

где $p_v=0.038$ – геометрическое альbedo астероида Шейла (Tedesco, Desert 2002). Оценки диаметра астероида по измерениям блеска H в фильтре R приведены в табл.2.8, где, наряду с нашими данными, приведены другие оценки размера. По нашим измерениям эффективный диаметр, вычисленный по формуле (2.2) колеблется в интервале от 118.5 ± 1.6 до 124.1 ± 1.7 км, и эти величины весьма близки к оценкам, имеющимся в литературе и полученным по разным наблюдениям, в том числе и космическим (см. Tedesco, Desert 2002 и ссылки табл.2.8).

Таблица 2.8. Геометрический аспект, видимый и абсолютный блеск в фильтрах V и R , и диаметр астероида (596) Шейла по наблюдениям в МАОС и другим данным

Дата, UT	r , а.е.	Δ , а.е.	ph , град.	m_V , зв.вел.	m_R , зв.вел.	H_V , зв.вел.	H_R , зв.вел.	D , км
Июнь 16.85, 2017	2.452	1.473	8.2	12.24 ± 0.03	11.95 ± 0.03	9.1 ± 0.03	8.8 ± 0.03	118.5 ± 1.6
Июнь 17.73, 2017	2.453	1.478	8.6	12.19 ± 0.03	11.91 ± 0.03	9.0 ± 0.03	8.8 ± 0.03	118.5 ± 1.6
Июль 30.69, 2017	2.470	1.849	21.7	13.22 ± 0.03	12.93 ± 0.03	9.1 ± 0.03	8.8 ± 0.03	118.5 ± 1.6

Июль 31.71, 2017	2.471	1.861	21.8	13.27±0.03	12.96±0.03	9.1±0.03	8.8±0.03	118.5±1.6
Август 1.65, 2017	2.471	1.872	22.0	13.24±0.03	12.95±0.03	9.0±0.03	8.7±0.03	124.1±1.7
Январь- август 2010	-	-	-	-	-	-	-	159.7±1.1 (Masiero et al. 2012)
Февраль 15.64, 2010	3.93	3.14	16.8	-	11.00	-	8.7	118±6 (Bauer et al. 2012)
Декабрь 27.90, 2010	3.085	2.338	13.7	-	13.98	-	8.85	113±2 (Jewitt 2012)
Январь 04.90, 2011	3.073	2.254	11.9	-	13.86	-	8.86	113±2 (Jewitt 2012)
Май 06.80, 2011	2.877	2.753	20.4	-	14.63	-	9.36	102±3 (Neslushan et al. 2016)
Май 08.80, 2011	2.873	2.776	20.4	-	14.43	-	9.40	102±3 (Neslushan et al. 2016)
Май 22.80, 2011	2.850	2.932	20.0	-	14.31	-	9.19	102±3 (Neslushan et al. 2016)
Декабрь 14.28, 2010	-	-	-	-	-	-	-	118±6 (Bodewits et al. 2011)

Показатель цвета объекта, наряду с его альбедо и характеристиками спектра отраженного солнечного света, является важной величиной, позволяющей определить таксономический тип астероида и, таким образом, его состав. На основе низкого значения альбедо $p_v=0.038$ (Tedesco, Desert 2002), величин показателей цвета $B-V=0.71$ и $U-B=0.18$ (<http://ssd.jpl.nasa.gov>, 2017), а также спектральных характеристик, Шейла может быть классифицирована как астероид примитивного Р- или D-типа со средней объемной плотностью $\rho=2$ г/см³, свойственной углеродистому материалу (карбонаты) (Dahlgren, Lagerkvist 1995). Отметим, что по измерениям образцов известных метеоритов такая плотность является типичной также для углистых хондритов (см., например, Consolmagno, Britt 1998, Consolmagno et al. 2008).

Средние величины показателя цвета объекта по нашим наблюдениям и другим данным, а также для Солнца приведены в табл.2.9. Как видно, показатели цвета 30.07.2017 г. весьма близки к значениям, полученным по наблюдениям 27.12.2010 и 4.01.2011, проведенным через 16 и 24 дня соответственно после вспышки Шейлы. Особо выделяются показатели цвета по наблюдениям практически сразу после вспышки Шейлы – 15.12.2010, такие данные не соответствует ни одному известному таксономическому классу (Betzler et al. 2012). Приведенные данные показывают, что показатели цвета Шейлы достаточно быстро после вспышки восстановились и вновь имеют значения, характерные для астероидов P- и D типов.

Таблица 2.9. Средние показатели цвета астероида (596) Шейла

Дата, UT	<i>B-V</i>	<i>V-R</i>	<i>R-I</i>
Июнь 16.85, 2017	0.71±0.05	0.29±0.03	0.32±0.03
Июнь 17.73, 2017	0.73±0.05	0.28±0.03	0.31±0.03
Июль 30.69, 2017	0.72±0.05	0.29±0.03	0.32±0.03
Июль 31.71, 2017	0.71±0.05	0.31±0.03	0.31±0.03
Август 01.65, 2017	0.71±0.05	0.29±0.03	0.32±0.03
Декабрь 27.90, 2010 (Jewitt 2012)	0.71±0.03	0.38±0.03	-
Январь 04.90, 2011 (Jewitt 2012)	0.71±0.03	0.38±0.03	-
Декабрь 15.49, 2010 (Neslushan et al. 2016)	0.52±0.004	0.49±0.006	0.38±0.009
Солнце (Holmberg et.al 2006)	0.64±0.02	0.35±0.01	0.33±0.01

Мы также оценили период вращения астероида. Для поиска периодических изменений блеска использованы программа «Period04», основанная на Фурье анализе (<https://www.univie.ac.at/tops/Period04>), и все

имеющиеся данные блеска в фильтре I. В результате получен спектр мощности рис. 2.6 , где амплитуда равная 0.50 соответствует периоду вращения 16.1 ± 0.2 часа и эта оценка близка к принятому значению периода вращения 15.8 ч. (<http://ssd.jpl.nasa.gov>, 2017; <http://www.minorplanetcenter.net/iau>, 2017).

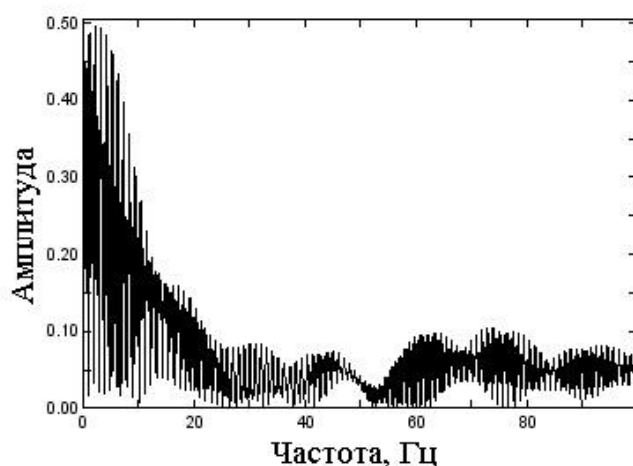


Рис.2.6. Спектр мощности, полученный в результате Фурье-анализа наблюдений астероида (596) Шейла в обсерватории Санглох в 2017 г.

2.1.5. Причина вспышечной активности астероида (596) Шейла

Астероид (596) Шейла относится к классу недавно выявленных объектов, неожиданно проявивших кометную активность, и названных активными астероидами.

Согласно ряду исследований, наиболее вероятной причиной внезапной активности астероида Шейла в 2010 г. является его столкновение с небольшим объектом из Главного пояса астероидов. Согласно данным, полученным космическим телескопом Hubble, астероид Шейла столкнулся со скоростью 5 км/с с неизвестным астероидом диаметром 35 м (Jewitt et al. 2011). В результате образовались фрагменты диаметром не более 100 м (предполагая значение альбедо астероида равным 0.04), а также пылевая кома с сечением рассеяния площадью почти 2.2×10^4 км², что соответствует облаку микронных частиц массой около 4×10^7 кг. После такого столкновения на поверхности астероида мог образоваться кратер диаметром

приблизительно 300 м (Bodewits et al. 2011). Прямые снимки некоторых астероидов, полученные с помощью космических аппаратов, показали наличие кратеров, которые имеют более голубой цвет по сравнению с остальной поверхностью (Chapman 1996). Большая часть поверхности астероидов покрыта реголитом темно-красного цвета из-за процессов космического выветривания, а области синего цвета на астероидах связаны с недавними выбросами внутреннего более свежего материала (Chapman 1996).

Результаты фотометрических наблюдений астероида, проведенных на 1.25 м телескопе АЗТ-11 Крымской астрофизической обсерватории в период 30 мая – 4 июня 2011 г. и на телескопе Цейсс-1000 Международной астрономической обсерватории Санглюх Института астрофизики НАНТ 16-17 июня и 30 июля – 1 августа 2017 г., показали, что существенных изменений динамических и физических свойств астероида после вспышки в 2010 г. не произошло. Орбита астероида, вычисленная по новым астрометрическим данным, сохраняет стабильность. Кривые блеска астероида свидетельствуют об отсутствии в пределах ошибок значительных изменений яркости астероида в период наблюдений. Среднее значение абсолютного блеска астероида в фильтрах V и R составляет 9.1 ± 0.05 (эфемеридная величина $V=8.9^m$) и 8.8 ± 0.03 зв. вел., соответственно. Среднее значение диаметра астероида составило 119 ± 2 км. Средние значения показателей цвета $B-V=0.72 \pm 0.05$; $V-R=0.29 \pm 0.03$; $R-I=0.31 \pm 0.03$ хорошо согласуются с имеющимися значениями и средними величинами для астероидов P и D типов. Величина периода вращения астероида, оцененная по новым фотометрическим наблюдениям, составила 16.1 ± 0.2 часа. Новые динамические и фотометрические данные хорошо согласуются с имеющимися в базах данных сведениями об астероиде Шейла. Можно сделать вполне логический вывод, что такая стабильность параметров свидетельствует, что причиной вспышечной активности действительно явилось столкновение с небольшим объектом. Анализ полученных данных показал, что астероид продолжает сохранять абсолютное значение блеска и

другие характеристики, несмотря на столкновение с малым телом в декабре 2010 г., приведшем к вспышке и появлению кометной активности астероида. Вероятнее всего, столкновение астероида (596) Шейла с малым телом не привело к катастрофическому изменению поверхности астероида или к его полному распаду, а выразилось лишь в кратерообразовании на его поверхности и выбросе огромного облака пыли, проявившееся в виде эпизодической кометной активности.

2.2. Результаты наблюдений вспышечной активности астероида (3552) Дон Кихот

Астероид (3552) Дон Кихот (1983 SA), далее 3552, был открыт в 1983 году швейцарским астрономом П. Вильдом в обсерватории Циммервальд (<http://www.ssd.jpl.nasa.gov>, 2019). Период обращения составляет 8.8 лет, и объект наблюдался в трех появлениях во время прохождения перигелия. Астероид имеет сильно вытянутую орбиту со значительным эксцентриситетом, пересекающую орбиты Марса и Юпитера, и не пересекающую орбиту Земли, вследствие чего объект классифицируется как астероид группы Амура. Однако, хотя орбита 3552 расположена за орбитой Земли, астероид в перигелии достаточно близко подходит к орбите Земли - до расстояния 0.2 а.е., что позволяет отнести его к астероидам, сближающимся с Землёй. Основные орбитальные характеристики астероида согласно базе данных НАСА (<http://www.ssd.jpl.nasa.gov>, 2019) приведены в табл. 2.10, где a – большая полуось, q , Q – перигелийное и афелийное расстояния, e – эксцентриситет, i – наклонение, ω – аргумент перигелия, Ω – долгота восходящего узла, T_j – критерий Тиссерана, P - период обращения.

Таблица 2.10 Основные параметры астероида (3552) Дон Кихот

Объект	a , а.е.	e	q , а.е.	Q , а.е.	i , град.	ω , град.	Ω , град.	T_j	P , годы
3552	4.259	0.709	1.240	7.278	31.081	316.448	350.003	2.31	8.79

Параметр Тиссерана для астероида 3552 имеет значение 2.31 (табл.2.10), следовательно, его орбита классифицируется как типичная орбита короткопериодических комет и уже на этой основе можно предположить кометное происхождение объекта. Veeder et al. (1989), используя результаты тепло-инфракрасных наблюдений и термическую модель, определили, что диаметр астероида составляет 18.7 км и его геометрическое альbedo в полосе V равно 0.02. Такое низкое значение альbedo является типичным для кометных ядер (Lamy et al. 2004, Jewitt 1992) и согласуется с таксономической классификацией 3552 как астероид D типа (Hartmann et al. 1987, Binzel et al. 2004). Астероидам примитивного P или D типа свойственна довольно низкая объемная плотность, в среднем $\rho=2$ г/см³ (Dahlgren, Lagerkvist 1995), типичная для углистых хондритов (Consolmagno, Britt 1998, Consolmagno et al. 2008). Кометное происхождение астероида было предсказано со 100% вероятностью и на основе динамического моделирования и эта самая высокая вероятность кометного происхождения среди всех известных AC3 (Bottke et al. 2002). Иными словами, исходя из приведенных аргументов, 3552 является одним из первых кандидатов в астероиды, имеющих кометную природу, среди известных околоземных объектов. Однако на тот момент никаких признаков активности у астероида не было зарегистрировано, поэтому было предположено, что объект является ядром угасшей кометы (Weissman et al. 1989, 2002).

Особый интерес к астероиду вновь возник после того, как 22 августа 2009 г. с помощью космического телескопа Спитцер у объекта в инфракрасном диапазоне спектра излучения на длине волны 4.5 мкм была зафиксирована кометная активность в виде небольшой комы и хвоста (Mommert et al. 2014). Данный волновой интервал соответствует эмиссии молекулярной полосы CO₂. Мониторинг длился 18 дней до прохождения астероидом перигелия, в это время 3552 находился на гелиоцентрическом расстоянии 1.23 а.е. и фазовом угле 55°, расстояние от телескопа Спитцер составляло 0.55 а.е., и объект имел аномальную яркость на полученных

снимках (Mommert et al. 2014). Опубликованные результаты предыдущих наблюдений 3552 в различных диапазонах длин волн, показали, что надежных данных, подтверждающих активность астероида, не было получено до 2009 г. ни из оптической фотометрии, ни из термических и инфракрасных измерений (Mommert et al. 2014). Следовательно, впервые кометная активность у астероида 3553 достоверно была зарегистрирована по инфракрасным измерениям в августе 2009 г. В октябре 2017 г. с помощью космического телескопа Спитцер вновь наблюдалась активность астероида 3552, подтвердившая ранее полученные результаты (Mommert et al. 2018a). Только в марте 2018 г. с помощью 4.1 м телескопа (Southern Astrophysical Research Telescope) впервые выявили эпизодическую пылевую активность этого объекта и в оптическом диапазоне (Mommert et al. 2018b).

Анализируя результаты наблюдений Mommert et al. (2014) пришли к заключению, что астероид 3552, действительно, является ядром угасшей кометы, которое вновь проявило активность. Регистрация излучения молекулярной полосы CO_2 свидетельствует о существовании ледяного CO_2 на астероиде 3552 и, следовательно, CO_2 может иметься в околоземном космическом пространстве в течение продолжительного времени. Ранее для объяснения существования замороженного CO_2 в околоземном пространстве Rickman et al. (1990) предположили, что лед может содержаться под толстым слоем поверхностного изоляционного материала. В частности, спектроскопические наблюдения в инфракрасном диапазоне телескопа Спитцер показали наличие на поверхности астероида 3552 мелкозернистых силикатов, возможно, обогащенных пироксеном (Mommert et al. 2014). Для объяснения наблюдаемой активности 3552 предложены два сценария: (1) подповерхностный замороженный газ CO_2 сублимирует вследствие сезонного нагрева, вызывая постоянную активность, или (2) наблюдаемая активность является временной, например, вызванной недавним столкновением с другим объектом, в результате которого обнажается замороженное подповерхностное вещество и происходит мощная

единовременная сублимация его летучих компонентов (CO или CO₂), что приводит к кратковременной вспышечной активности астероида. Однако для реализации обоих сценариев необходимо, чтобы объект находился вблизи Солнца, по крайней мере, на расстоянии $r=1.23$ а.е. (Mommert et al. 2014). Кроме того, наличие CO₂ может объяснить почему кометная природа 3552 оставалась скрытой почти три десятилетия. На основе термического моделирования фотометрических данных из наблюдений Спитцера было подтверждено, что диаметр астероида составляет 18.4 км и геометрическое альbedo равно 0.03 (Mommert et al. 2014).

Из вышеприведенных фактов следует, что объект 3552 представляет несомненный научный интерес, существует необходимость его дальнейшего изучения для получения новых доказательств его происхождения. В этой связи целью новых наблюдений астероида 3552 является продолжение анализа его фотометрических характеристик – блеска, оценки диаметра, показателей цвета.

Как было отмечено, в марте 2018 г. у астероида 3552 по оптическим наблюдениям зарегистрирована кометная активность в виде слабой комы. 7 мая 2018 г. астероид прошел перигелий своей орбиты. Для поиска признаков активности 14, 23 и 24 июля 2018 г. были проведены наблюдения объекта на телескопе Цейсс-1000, снабженного ПЗС камерой FLI Proline PL16803, в Международной астрономической обсерватории Санглов Института астрофизики НАНТ. Основные характеристики приборов в данных наблюдениях такие же, как в мониторинге астероида Шейла. Использовались стандартные широкополосные фильтры системы Джонсона-Козинса VRI. Для уменьшения уровня шумов ПЗС камеры аппаратура была охлаждена до температуры -20⁰С. Для учета темнового сигнала использованы кадры «Dark», для выравнивания полей изображений использованы кадры «Flat», для учета ошибок матрицы ПЗС-камеры снимались кадры «Bias», которые также использовались в обработке кадров. За весь период наблюдений получено 340 кадров с экспозицией 60 секунд. Снимки астероида 3552

приведены на рис.2.7. Дата и время наблюдений астероида в долях суток мирового времени, количество полученных изображений N , время экспозиции t , а также гео- и гелиоцентрические расстояния r , Δ , фазовый угол ph астероида и его эфемеридная яркость V приведены в табл. 2.11.

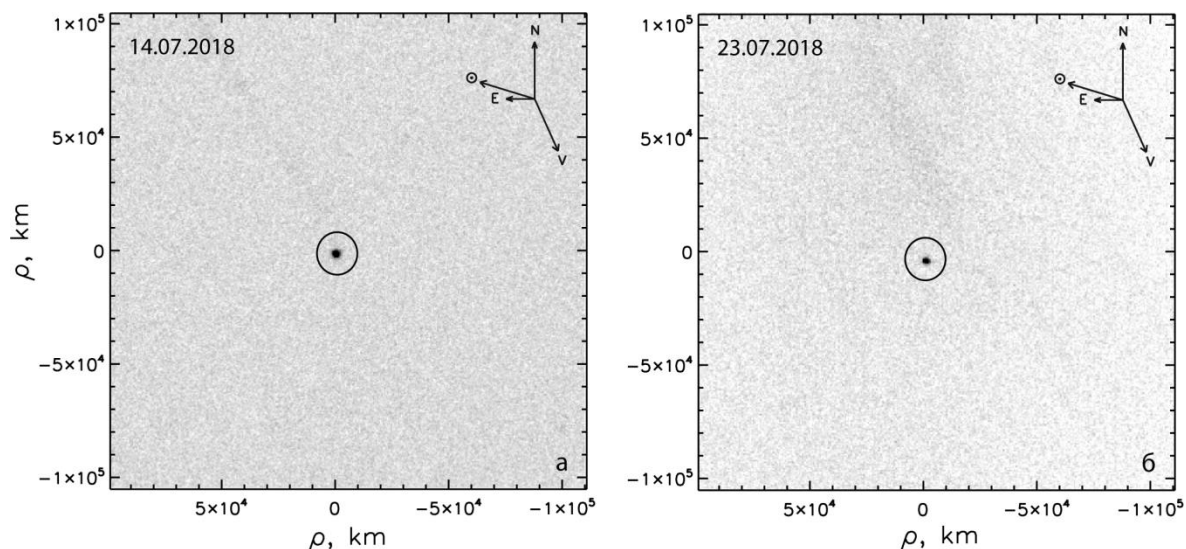


Рис.2.7. Изображения астероида Дон Кихот, полученные в обсерватории Санглож 14.07.2018 г. (а) и 23.07.2018 г. (б).

Таблица 2.11. Сводка наблюдений астероида 3552 Дон Кихот в обсерватории Санглож

Июль,2018 UT	r , а.е.	Δ , а.е.	ph , град.	V , зв.вел.	N x Фильтр	t , с
14.92	1.506	1.478	39.8	16.2	30xV, 30xR	60
23.86	1.569	1.465	38.9	16.3	30xV, 30xR, 30xI	60
24.86	1.577	1.463	38.8	16.3	30xV, 30xR, 30xI	60

2.2.1. Определение динамических свойств

В данном параграфе представлены результаты астрометрии наблюдений и определения динамических свойств астероида, проведенных с целью их анализа до и после его вспышки. Напомним, что основные

орбитальные характеристики астероида, приведены в табл. 2.12. Астрометрическая обработка наблюдений, проведенных в МАОС в 2018 г., была выполнена с помощью программного пакета АПЕКС-II (Девяткин и др. 2010). В качестве опорного использован астрометрический каталог UCAC5 (www.harvard.edu/catalogs), в котором координаты звезд приведены с астрометрической точностью около 0.03". Средняя по всем кадрам ошибка астрометрической редукции составляет 0.80" и 0.57" для прямого восхождения α и склонения δ , соответственно. В табл.2.13 представлены средние значения отклонений измеренных экваториальных координат (O) от каталожных данных (C), обозначенные как $(O-C)_\alpha$ и $(O-C)_\delta$ для координат α и δ , соответственно, а также их средние квадратичные ошибки σ_α и σ_δ по наблюдениям в МАОС. Координаты астероида, найденные из астрометрической обработки наших наблюдений, приведены в табл.2.14. В графическом виде видимая траектория астероида 3553 по наблюдениям в МАОС и по другим наблюдениям (https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?utf8=✓object_id=3552, MPS 908006, 2018) приведена на рис.2.8., где по оси абсцисс даны α – прямое восхождение и по оси ординат δ – склонение астероида. Как видно, наши координаты вполне укладываются в видимую траекторию астероида, построенную по разным наблюдениям.

Таблица 2.12. Точность наблюдений или средние разности (O-C) и их стандартные отклонения для астероида (3552) Дон Кихот в обсерватории Санглох

Дата	$(O-C)_\alpha$	σ_α	$(O-C)_\delta$	σ_δ
14.07. 2018	0.885"	0.026"	0.690"	0.025"
23.07. 2018	0.770	0.019	0.479	0.008
24.07. 2018	0.731	0.028	0.517	0.029

Таблица 2.13. Экваториальные координаты астероида Дон Кихот по наблюдениям в МАОС

№	Дата	Момент наблюдений (UT)	α	δ	m, зв.вел.
1	14.07.2018	22 ^h 16 ^m 26.1 ^s	02 ^h 23 ^m 01.15 ^s	20° 51' 19.7"	15.6
2	14.07.2018	22 16 52.0	02 23 01.18	+20 51 20.1	15.6
3	14.07.2018	22 21 59.6	02 23 01.44	+20 51 26.6	15.7
4	14.07.2018	22 24 03.1	02 23 01.60	+20 51 29.1	15.9
5	14.07.2018	22 25 13.1	02 23 01.66	+20 51 30.6	15.7
6	14.07.2018	22 26 49.0	02 23 01.75	+20 51 32.7	15.6
7	14.07.2018	22 28 24.9	02 23 01.83	+20 51 34.4	15.6
8	14.07.2018	22 33 42.0	02 23 02.14	+20 51 40.8	15.9
9	14.07.2018	22 34 51.1	02 23 02.23	+20 51 42.7	15.9
10	14.07.2018	22 35 17.9	02 23 02.24	+20 51 42.8	15.9
11	23.07.2018	20 48 18.4	02 35 02.96	+25 13 01.1	16.3
12	23.07.2018	20 50 51.3	02 35 03.09	+25 13 04.2	16.3
13	23.07.2018	20 51 27.6	02 35 03.13	+25 13 05.0	16.2
14	23.07.2018	20 53 23.4	02 35 03.23	+25 13 07.3	16.4
15	23.07.2018	20 55 56.3	02 35 03.36	+25 13 10.3	16.6
16	23.07.2018	20 56 32.6	02 35 03.39	+25 13 11.1	16.1
17	23.07.2018	20 58 29.2	02 35 03.49	+25 13 13.4	16.4
18	23.07.2018	20 59 06.4	02 35 03.52	+25 13 14.1	16.2
19	23.07.2018	21 01 37.6	02 35 03.66	+25 13 17.2	16.4
20	23.07.2018	21 03 34.2	02 35 03.75	+25 13 19.5	16.6
21	23.07.2018	21 04 11.4	02 35 03.79	+25 13 20.3	16.4
22	23.07.2018	21 06 06.3	02 35 03.89	+25 13 22.6	16.6
23	24.07.2018	20 55 59.8	02 36 18.06	+25 41 53.2	16.9
24	24.07.2018	20 58 31.8	02 36 18.19	+25 41 56.3	16.5

25	24.07.2018	21 01 03.9	02 36 18.30	+25 41 59.3	16.8
26	24.07.2018	21 01 41.0	02 36 18.36	+25 41 59.9	16.7
27	24.07.2018	21 03 36.8	02 36 18.45	+25 42 02.3	16.9
28	24.07.2018	21 04 14.0	02 36 18.49	+25 42 03.1	16.7
29	24.07.2018	21 06 46.0	02 36 18.58	+25 42 06.3	16.6
30	24.07.2018	21 08 41.8	02 36 18.70	+25 42 08.4	16.9
31	24.07.2018	21 09 19.0	02 36 18.75	+25 42 09.3	17.0
32	24.07.2018	21 11 51.0	02 36 18.82	+25 42 11.9	16.7
33	24.07.2018	21 13 45.9	02 36 18.95	+25 42 14.9	16.9
34	24.07.2018	21 14 23.1	02 36 18.99	+25 42 15.3	17.0
35	24.07.2018	21 16 18.9	02 36 19.08	+25 42 17.5	16.8

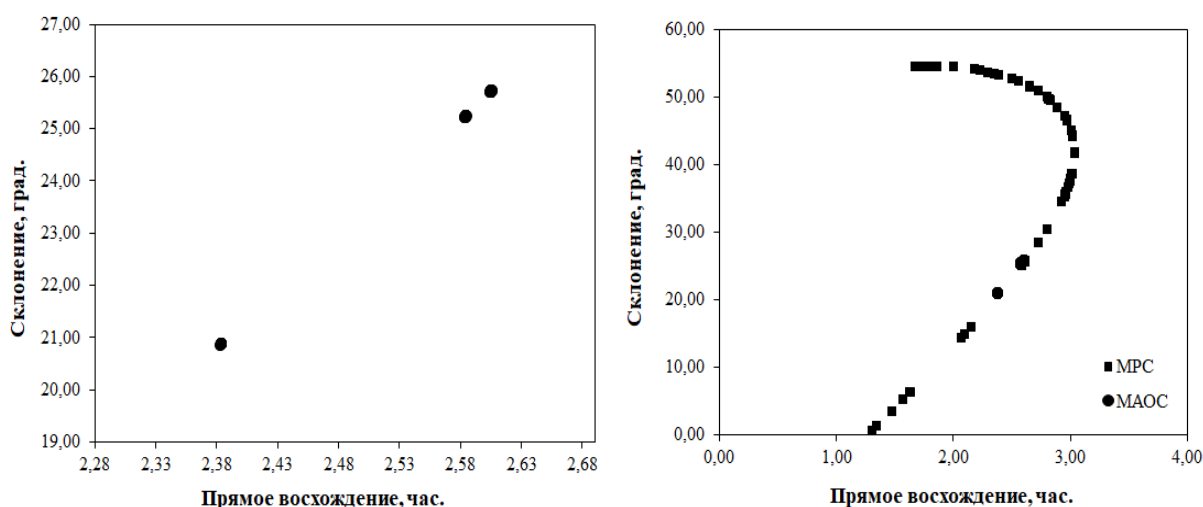


Рис.2.8. Видимая траектория астероида (3552) Дон Кихот по наблюдениям на Санглохе (слева) и по данным различных наблюдений в 2018 г. (справа).

Используя измеренные координаты астероида в нескольких положениях, можно построить его орбиту. Для этого существует много методов, которые применяются в зависимости от расположения измеренных точек на орбите и от того, какие возмущения учитываются. По небольшому количеству наблюдений строится первоначальная орбита, которая потом

уточняется с помощью дополнительных новых наблюдений. Определение орбиты астероида 3552 выполнялось с использованием ПП ЭПОС, разработанного в Пулковской обсерватории (Львов, Цекмейстер 2012) Для среднего момента наблюдений МАОС с использованием 208 наблюдений удалось получить первоначальную орбиту астероида, приведенную в табл.2.14. Здесь даны следующие элементы орбиты в равноденствии 2000.0: e — эксцентриситет, a — большая полуось, q — перигелийное расстояние, i — наклонение, ω — аргумент перигелия, Ω — долгота восходящего узла, n — среднее суточное движение, σ — средняя квадратичная ошибка. Для сравнения в табл.2.14 приведена орбита, вычисленная на основе 1250 наблюдений астероида в различных обсерваториях согласно базе данных MPC

(https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?utf8=✓&object_id=3552, MPO 525959, 2018) и в последнем столбце показаны разности между данными. С учетом разных эпох, на которые приведены орбиты, орбита, вычисленная по нашим наблюдениям, имеет минимальные отклонения от орбиты, полученной по наблюдениям до вспышки астероида. Можно предположить, что орбита сохранила свою стабильность и, следовательно, удар не был катастрофичным для объекта.

Таблица 2.14. Элементы орбиты астероида Дон Кихот (J2000.0) по данным различных наблюдений

Элементы орбиты	МАОС [данная работа]	MPO 525959	Σ
Кол-во положений использованное для вычисления	208	1250	-

орбиты			
T	JD 2457942.61	JD 2458246.22	-
Эпоха	2458324.5	2459000.5	-
e	0.708894	0.708941	-0.000047
a. а.е.	4.260625	4.260619	0.000006
q. а.е.	1.240019	1.240093	-0.000074
i. град.	31.084498	31.084421	-0.000077
ω . град.	316.49798	316.4979	-0.00008
Ω . град.	349.96486	349.96481	0.00005
n. град./сут.	0.112245	0.112271	-0.000026
σ	0".442	0".446	-

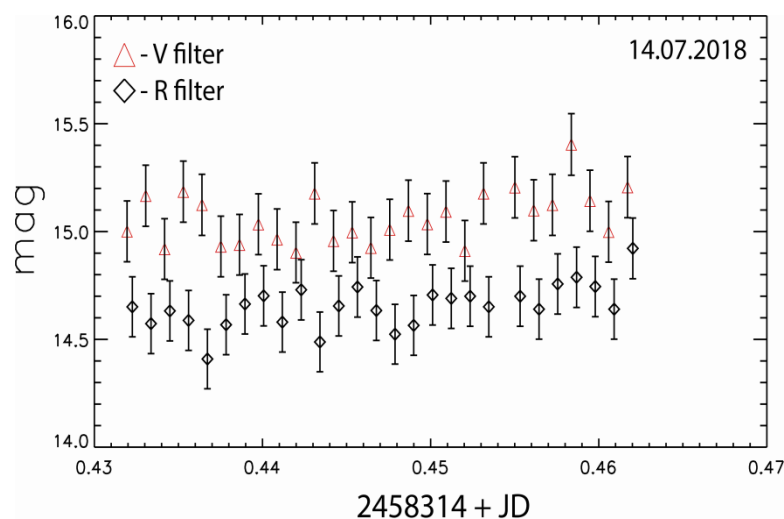
2.2.2. Исследование физических свойств астероида Дон Кихот блеск, кривая блеска, показатели цвета, диаметр, морфология

Фотометрическая обработка наблюдательных данных проводилась с помощью набора программ написанных под IDL (<https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/IDL>). Для стандартной обработки изображений созданы мастер-кадры нулевой экспозиции, темнового и плоского полей, с помощью которых все кадры с изображением астероида были исправлены за нуль пункт и неравномерность чувствительности пикселей. Фон неба был определен с помощью стандартной процедуры Sky пакета IDL (Landsman 1993). Для определения видимого блеска астероида были использованы звезды поля, которые предварительно исследовались на переменность. Звездные величины звезд сравнения в фильтрах VRI брались из каталога UCAC4 и NOMAD (<http://tdc-www.harvard.edu/catalogs/index.html>). Для измерений изображений астероида и звезд поля использовалась апертура фиксированного радиуса от 5 до 7 угловых секунд (проекция на картинную плоскость объекта составляет соответственно от 1919 до 2686 км), которая позволила охватить объект полностью. Остаточный фон неба оценивался при помощи кольцевой

апертуры. При вычислении ошибки звездной величины суммировались статистические ошибки, которые обусловлены отношением сигнала к шуму S/N для объекта, звезд сравнения, ошибки каталожных звездных величин звезд-стандартов. В процессе обработки с помощью программ IDL ошибка для звезд сравнения при использовании каталогов UCAC4 и NOMAD оказалась равной 0.02^m и 0.04^m соответственно. Таким методом были получены видимый блеск m и кривые видимого блеска астероида 3552 в VRI фильтрах за каждую ночь наблюдений, представленные на рис.2.10, где по оси ординат отложены видимые звездные величины m и по оси абсцисс - время наблюдений в юлианских днях. Средние значения видимых звездных величин объекта, полученные в разных фильтрах, даны в табл. 2.15.

Таблица 2.15. Видимый блеск (зв. вел.) астероида (3552) Дон Кихот по наблюдениям в обсерватории Санглох в июле 2018 г.

Фильтр	14.92	23.86	24.86
V	15.06 ± 0.12	16.52 ± 0.17	16.64 ± 0.18
R	14.63 ± 0.10	16.19 ± 0.17	16.32 ± 0.18
I	-	15.93 ± 0.16	16.21 ± 0.16



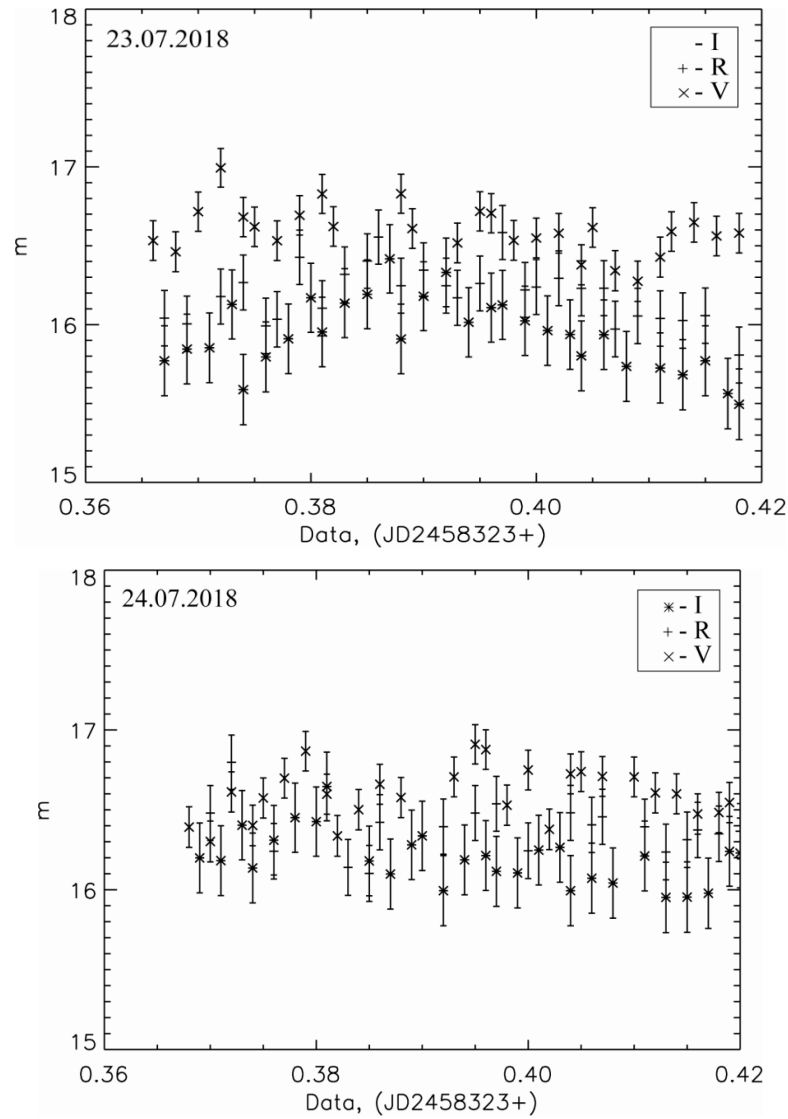


Рис. 2.10. Кривые видимого блеска астероида (3552) Дон Кихот в фильтрах VRI по наблюдениям в обсерватории Санглох 14, 23 и 24 июля 2018 г.

Известно, что блеск астероидов сильно зависит от фазового угла (см., например, Lumme et al. 1986, Belskaya, Shevchenko 2000, Лупишко и др. 2007). Видимый блеск m астероида 3553 конвертировался в абсолютный H с использованием эмпирической модели (Penttila et al. 2016) и по следующему соотношению (Bowell et al. 1989), позволяющим более точно описать изменение блеска астероида в диапазоне фазовых углов от 0 до 120 град:

$$\begin{aligned}
 H &= m - 5\log(r\Delta) + 2.5\log[(1-G)\Phi_1 + G\Phi_2], \\
 \Phi_i &= \exp\left[-A_i \{tg(\beta/2)\}^{B_i}\right] i = 1, 2,
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

где G – параметр наклона, найденный лишь для небольшого числа астероидов, для остальных принято значение $G=0.15$; Φ_1, Φ_2 – функции угла фазы, $A_1=3.33, A_2=1.87, B_1=0.63$ и $B_2=1.22$ – коэффициенты, значения которых приведены в Penttila et al. (2016). Найденный таким путем абсолютный блеск астероида в фильтре R (средние значения за ночь) приведен в табл. 2.16, и в графическом виде – на рис.2.11.

Таблица 2.16. Абсолютный блеск и диаметр астероида (3552) Дон Кихот

Июль, 2018 UT	r , а.е.	Δ , а.е.	ph , град.	m_R , зв.вел.	H_R , зв.вел.	D , км	D , км
14.92	1.506	1.478	39.8	14.63 ± 0.10	11.50 ± 0.10	38^{+2}_{-1}	19.0^1 18.4^2
23.86	1.569	1.465	38.9	16.19 ± 0.17	13.02 ± 0.18	19^{+2}_{-3}	
24.86	1.577	1.463	38.8	16.32 ± 0.18	13.10 ± 0.18	18^{+2}_{-3}	

¹<http://www.ssd.jpl.nasa.gov>

² Mommert et al. (2014)

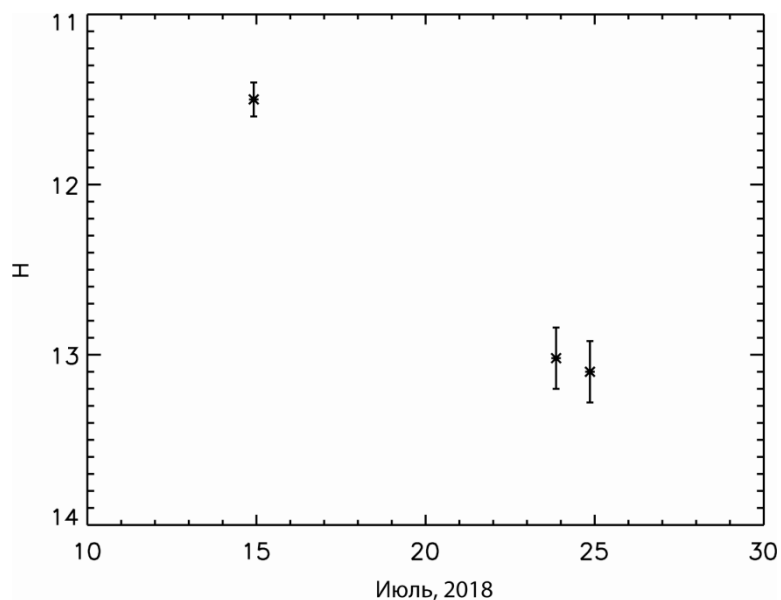


Рис. 2.11. Абсолютный блеск астероида (3552) Дон Кихот в фильтре R по наблюдениям в обсерватории Санглох 14,23 и 24 июля 2018 г.

Фотометрические данные (табл.2.15-2.16, рис.2.10-2.11) показывают, что 14 июля 2018 г. нами зарегистрирована вспышечная активность астероида, об этом свидетельствует блеск, измеренный 14 июля, значительно

отличающийся и от эфемеридного значения и от яркости, измеренной 23 и 24 июля. Наиболее близкое к эфемеридной величине значение яркости получено по наблюдениям 24 июля, на основании этого можно сказать, что после вспышки 14 июля яркость астероида падала и в конце наблюдений уже соответствовала эфемеридному блеску. Иными словами, к этому моменту вспышка завершилась. Анализ суммарных изображений астероида 3552 также показал наличие слабой пылевой комы рис.2.12.

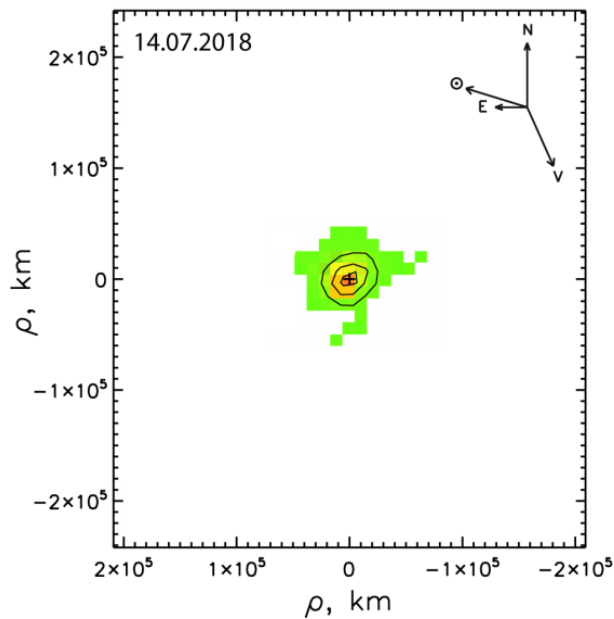


Рис. 2.12. Слабая кома астероида (3552) Дон Кихот по наблюдениям в обсерватории Санглох 14 июля 2018 г.

Величину блеска астероида, найденную из фотометрических наблюдений, можно использовать для определения диаметра объекта. Хотя размер 3552 известен, существует необходимость оценивать диаметр по новым наблюдениям, для уточнения размера и полноценного анализа состояния объекта на момент этих наблюдений. Для оценки диаметра D астероида 3552 использованы измерения его блеска в фильтре R и следующее соотношение, принятое для оценки размеров астероидов (Harris 2002):

$$D = \frac{1329}{\sqrt{p_v} \cdot 10^{0.2H}}, \quad (2.4)$$

где $p_v=0.03$ геометрическое альbedo астероида (Mommert et al. 2014). Найденные таким методом оценки диаметра астероида приведены в табл.2.16, где, наряду с нашими данными, приведены имеющиеся оценки размера. Как видно, эффективный диаметр, найденный по нашим измерениям 14 июля, также указывает, на то, что в этот момент астероид находился в состоянии вспышки, и об этой величине можно говорить лишь как об оценке фотометрического диаметра. Яркость объекта значительно возросла за счет вклада излучения комы, образовавшейся в результате вспышки, и отделить этот вклад в процессе измерений не удалось. Оценки диаметра $18-19\pm 2.5$ км, полученные по фотометрическим данным 23 и 24 июля, оказались более близки к оценкам, имеющимся в базе опубликованных данных. С учетом кривых блеска, можно заключить, что к этому времени кома уже рассеялась, и измеренный блеск астероида приблизился к эфемеридной величине, в результате нами получены более достоверные оценки эффективного диаметра объекта.

Показатель цвета ($V-R$), найденный из наших наблюдений приведен в табл.2.17, где для сравнения приведены показатель цвета ($V-R$) следующих групп малых тел: DSPN – угасшие ядра короткопериодических комет (Licandro et al. 2008), JFCN – ядра комет семейства Юпитера (Lamy, Toth 2009), AJFC – активные кометы семейства Юпитера (Solontoi et al. 2012), D-type NEAs – AC3 D типа (Dandy et al. 2003) согласно таксономической классификации Толена (1989).

Таблица 2.17. Показатель цвета ($V-R$) астероида (3552) Дон Кихот по наблюдениям в обсерватории Санглож

Дата	14.92	23.86	24.86	DSPN	JFCN	AJFC	D-type NEAs
V-R	0.43 ± 0.10	0.33 ± 0.18	0.40 ± 0.18	0.39	0.49 ± 0.03	0.46 ± 0.02	0.46 ± 0.02

Из табл.2.17 видно, что показатель цвета ($V-R$), найденный 14 июля, больше всего соответствует показателю цвета ($V-R$) активных комет семейства Юпитера и AC3 D типа. Это вполне ожидаемый результат, поскольку 14 июля 3552 находился в состоянии кометной активности. В остальные ночи этот показатель более соответствует величине ($V-R$) угасших ядер короткопериодических комет. Существенное «покраснение» объекта в период наблюдений вполне ожидаемое явление, поскольку мелкие пылевые частицы являются более красными по отражательной способности, чем ледяные зерна, то можно предположить, что в эти ночи их вклад в излучение астероида в оптическом диапазоне стал превалирующим. Хотя вспышка к 24 июля завершилась, и основная пылевая кома уже рассеялась, объект все еще находился в облаке пылевых частиц, выброшенных с его поверхности во время вспышки. Напомним, что наличие на поверхности астероида 3552 мелкозернистых силикатов подтверждено наблюдениями телескопа Спитцер (Mommert et al. 2014) и классификация объекта как астероида D типа также подразумевает содержание значительного количества гидросиликатов и карбонатов (Cruikshank et al. 2001).

2.2.3. О природе околоземного астероида (3552) Дон Кихот

В то время как наблюдения в инфракрасном диапазоне в 2009 г. подтвердили активность астероида 3552 вследствие сублимации сверх летучего газа CO_2 , содержащегося в замороженном состоянии в подповерхностном слое объекта, оптические наблюдения в марте и июле 2018 года подтвердили активность вследствие выброса пыли с поверхности астероида и образования слабой комы. Если допустить, что в период прохождения перигелия в 2018 г. процесс сублимации CO_2 происходил вследствие увеличения солнечного нагрева и высвободившийся газ захватывал с собой мелкие частицы пыли с поверхности астероида, то такой «нормальной» кометной активности не достаточно для образования вспышки яркости, связанной с единовременным выбросом огромного количества пыли, особенно, если учесть, что перигелий был пройден в начале мая 2018 г.

Более того, уже через 10 дней после регистрации вспышки, блеск астероида приблизился к эфемеридному значению, что указывает на завершение активной фазы. Зарегистрированная вспышка и, как следствие, выброс пыли, скорее всего, обусловлены тем, что на фоне нормальной кометной активности вблизи перигелия дополнительно имело место столкновение астероида 3552 с небольшим объектом – крупным метеороидом или бомбардировка его поверхности мелкими метеороидами, в результате чего произошло взрыхление поверхности и наблюдаемый выброс пыли. Разумеется, в этом случае из-за большего повреждения поверхностного слоя усилился и выброс CO_2 , регистрация которого была бы возможна по инфракрасным наблюдениям. Отметим, по наблюдениям 24 июля блеск астероида в фильтре I стал ближе к блеску в фильтре R.

По оптическим наблюдениям астероида (3552) Дон Кихот в обсерватории Санглох 14 июля 2018 г. зарегистрирована вспышка яркости, повлекшая за собой образование пылевой комы у объекта. 24 июля 2018 г. блеск астероида приблизился к эфемеридной величине. Столь быстрое падение блеска предполагает, что выброс пыли и, как следствие, вспышка яркости, явились результатом столкновения 3552 с другим небольшим объектом или бомбардировки его поверхности мелкими метеороидами. Оценки эффективного диаметра, полученные по наблюдениям 23 и 24 июля 2018 г., соответствуют имеющимся данным, можно предположить, что столкновение не было катастрофичным для астероида.

Таким образом, с учетом: доказанного факта наличия замороженного нейтрального газа CO_2 в подповерхностном слое астероида, характера изменения блеска, соответствия величин показателей цвета, полученных по нашим наблюдениям, значениям для ядер угасших короткопериодических комет, кометоподобной орбиты, низкого значения альбедо и зарегистрированной реактивации объекта в июле 2018 г. можно сделать вывод, что с очень высокой вероятностью, объект 3552 действительно может

быть ядром угасшей кометы. Для большей убедительности этого вывода необходимы новые наблюдения астероида.

Выводы по главе II

Представлены результаты астрометрических и фотометрических в фильтрах BVRI наблюдений активного астероида (596) Шейла, проведенных на телескопе АЗТ-9 Крымской астрофизической обсерватории в 2011 г. и телескопе Цейсс-1000 Международной астрономической обсерватории Сангloch Института астрофизики НАНТ в 2017 г. Определены координаты объекта и орбита, получены видимый блеск астероида в четырех фильтрах, абсолютный блеск в фильтрах V и R, и показатели цвета. Кривые блеска свидетельствуют об отсутствии значительных изменений яркости астероида в период наблюдений. Абсолютный блеск астероида в фильтрах V и R составил 9.1 ± 0.05 и 8.8 ± 0.03 зв. вел., соответственно. Среднее значение диаметра астероида составило 119 ± 2 км. Средние значения показателей цвета $B-V=0.72 \pm 0.05$; $V-R=0.29 \pm 0.03$; $R-I=0.31 \pm 0.03$ хорошо согласуются с имеющимися значениями и средними величинами для астероидов P и D типов. Величина периода вращения астероида, оцененная по фотометрическим наблюдениям, составила 16.1 ± 0.2 часа. Анализ полученных данных показал, что астероид и в 2011 г., и в 2017 г. сохранил видимое и абсолютное значения блеска, и другие характеристики, несмотря на столкновение с малым телом в декабре 2010 г., приведшем к вспышке и появлению кометной активности астероида. Орбита объекта не претерпела значительных изменений. Вероятнее всего, объект является истинным астероидом, а его столкновение с малым телом не привело к катастрофическому изменению поверхности астероида или к его полному распаду.

Представлены результаты многоцветных оптических наблюдений астероида (3552) Дон Кихот, проведенных на телескопе Цейсс-1000 обсерватории Сангloch в 2018 г. Определен видимый и абсолютный блеск астероида в полосах VRI. Анализ кривых блеска астероида показал

значительное изменение блеска в период наблюдений - от 11.50 ± 0.10 до 13.10 ± 0.18 абсолютных звёздных величин. Столь существенное изменение блеска свидетельствует о вспышке астероида, следовательно, нами зафиксирована его активность, характерная для комет. Показатель цвета (V-R) по нашим наблюдениям соответствует величинам для ядер угасших короткопериодических комет и астероидов D типа. Кометоподобная орбита, низкое значение альбедо, показатель цвета и зарегистрированная активность указывают на то, что астероид с очень высокой вероятностью является ядром угасшей кометы. Среднее значение эффективного диаметра астероида по наблюдениям через 10 суток после вспышки составило 18.5 ± 2.5 км, и эта оценка хорошо согласуется с имеющимися данными, что подразумевает завершение вспышки. Сделано предположение, что выброс пыли и, как следствие, вспышка яркости, явились результатом столкновения астероида 3552 с другим небольшим объектом или бомбардировки его поверхности мелкими метеороидами. Стабильность орбиты указывает на то, что удар не был катастрофичным и не привел к разрушению объекта.

С учетом кометоподобной орбиты, низкого значения альбедо и зарегистрированной реактивации объекта в июле 2018 г. можно сделать вывод, что с очень высокой вероятностью, объект 3552 действительно может быть ядром угасшей кометы.

В Главе 2 изучены два активных объекта: активный астероид ГПА (596) Шейла и астероид, сближающийся с Землей, (3552) Дон Кихот. Астероиды внезапно проявили признаки кометной активности, вследствие чего стали актуальным предметом всестороннего исследования. Целью явилось определение возможных причин активности и установление истинной природы астероидов. В результате показано, что с высокой вероятностью (596) Шейла является истинным астероидом, в то время как (3552) Дон Кихот представляет собой ядро угасшей кометы. Установлено, что причиной проявленной ими кометной активности является столкновение с небольшими объектами или бомбардировка поверхности метеороидами.

ГЛАВА III. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВОЙСТВЕННОГО ОБЪЕКТА 2008GO98 (362P)

3.1 Результаты наблюдений двойственного объекта

2008GO98 (362P) в 2017 г.

В данной главе исследуется объект, имеющий из-за двойственности свойств и астероидное обозначение (457175) 2008 GO98 и кометное – 362P. Астероид (457175) 2008GO98 (в дальнейшем 2008 GO98) был открыт в апреле 2008 года в рамках наблюдательной программы Spacewatch в национальной обсерватории Kitt Peak в Аризоне (https://www.minorplanetcenter.net_id=457175). Перигелийное и афелийное расстояния орбиты 2008GO98 составляют 2.9 и 5.1 а.е., соответственно, и поэтому он классифицируется как астероид из внешней границы Главного пояса (ГПА) (<https://www.asteroidanalytics.com/2008go98/>) и в соответствии с этим получил обозначение, принятое для астероидов. Отметим, что в настоящее время выбор между кометным и астероидным обозначением для вновь обнаруженного объекта основан на наличии или отсутствии видимой комы. В июле 2017 г. у астероида одновременно двумя наблюдателями зарегистрирована кометная активность в виде яркой комы и широкого продолжительного хвоста (<https://www.minorplanetcenter.net/mpec/K17/K17N50.html>). Вследствие этого 2008GO98 получил новое уже кометное обозначение 362P и был включен в список объектов с двойным статусом – малых тел, имеющих обозначения и астероида, и кометы (<https://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/DualStatus.html>). В настоящий момент в этом списке порядка 10 таких объектов. До регистрации кометной активности в 2017 г., в результате динамического моделирования сделано предположение о принадлежности астероида к семейству комет квази-Хильды (quasi-Hilda comets QHCs) (Gil-Hutton, Garsia-Migani 2016). В области астероида Хильда имеется группа астероидов, среднее движение которых находится в резонансе 3:2 с Юпитером, и это одна из самых

динамически устойчивых внешних зон главного пояса астероидов (Schubart 1991, Nesvorny 1997, Ferraz-Mello et al. 1998). Орбиты этих астероидов имеют большую полуось в пределах $3.7 \leq a \leq 4.2$ а.е., эксцентриситет $e \leq 0.3$ и наклонение $i \leq 20$ град. и предельный аргумент резонанса колеблется вокруг 0 град. (Zelnerr et al. 1985). Принято считать, что несколько комет семейства Юпитера в прошлом столетии находились в области Хильды со средним движением в нестабильном резонансе 3:2 с Юпитером, вследствие чего они были переброшены с внешней границы орбиты Юпитера во внутреннюю зону. Кресак (Kresak 1979) назвал эти объекты кометами квази-Хильды и в настоящее время в этой области имеется несколько комет (Gil-Hutton, Garsia-Migani 2016). Зарегистрированная в 2017 г. кометная активность 2008 GO98 подтвердила этот прогноз. Период обращения 2008 GO98 составляет 7.89 лет и предпоследние прохождения перигелия его орбиты произошли в ноябре 2000 г. и затем в октябре 2008 г., когда он был открыт. Если, как было предположено, объект находится во внутренней Солнечной системе всего лишь в течение 3700 лет, то он должен был постоянно проявлять кометную активность во время каждого прохождения перигелия. Если рассмотреть все случаи, в которых он наблюдался, то кометная активность должна была проявиться в 2008-2009 гг., а также, возможно, в 2001-2002 гг. Однако в эти периоды этого не произошло, а впервые кометная активность зарегистрирована только в июле 2017 г. (прохождение перигелия состоялось в августе 2016 г.). Следовательно, либо, несмотря на расположение в Главном поясе астероидов объект 2008 GO98 является ядром угасшей кометы, либо существуют некоторые пробелы в информации о нем. Таким образом, двойственный объект 2008 GO98, несомненно, представляет значительный научный интерес. Актуальность его исследований связана с необходимостью получения большей информации о его динамических и физических свойствах на основе наблюдений, и тем самым, получением данных о его действительном происхождении.

Основные орбитальные характеристики астероида приведены в табл. 3.1 (<https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>) где a – большая полуось, q , Q – перигелийное и афелийное расстояния, e – эксцентриситет, i – наклонение, ω – аргумент перигелия, Ω – долгота восходящего узла, T_j – критерий Тиссерана, P – период обращения.

Таблица 3.1. Основные параметры астероида 2008 GO98

Объект	a , а.е.	e	q , а.е.	Q а.е.	i , град.	ω , град.	Ω , град.	T_j	P , годы
2008GO98	3.965	0.280	2.853	5.077	15.567	53.574	192.609	2.93	7.90

Параметр Тиссерана для 2008 GO98 имеет значение 2.93 (табл.3.1), следовательно, его орбита классифицируется как типичная орбита комет семейства Юпитера (Jewitt 2012) и уже на этой основе можно предположить кометное происхождение объекта. Согласно базе, данных (https://www.minorplanetcenter.net_id=457175, <https://www.asteroidanalytics.com/2008go98/>) спектральная классификация 2008 GO98 – астероид С типа и для альbedo, соответствующее такому типу, принято значение 0.057, что является типичным для кометных ядер (Lamy et al. 2004, Jewitt 2012). С использованием этой величины альbedo и абсолютного блеска астероида $H=12.9$ звездных величин (<https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top>) вычислен его эффективный диаметр 14.64 км (<https://www.asteroidanalytics.com/2008go98/>). Однако, имеются и другие оценки диаметра в интервале 5.5–24.7 км, полученные на основе нескольких опубликованных измерений блеска и допущения величин альbedo в большом диапазоне (<https://www.asteroidanalytics.com/2008go98/>). Следовательно, такой разброс в оценке диаметра связан с неопределенностью величин абсолютного блеска и альbedo. Получена также оценка периода вращения 10.7-14.6 часов (<https://www.asteroidanalytics.com/2008go98/>). Для получения новых динамических и физических данных о двойственном объекте 2008 GO98,

нами 30 июля 2017 г. проведены его наблюдения на телескопе Цейсс-1000, снабженного ПЗС камерой FLI Proline PL16803, в Международной астрономической обсерватории Санглох (МАОС) Института астрофизики НАНТ. Основные характеристики телескопа и матрицы ПЗС камеры приведены в предыдущих параграфах. В наблюдениях использовался фильтр R из широкополосной стандартной фотометрической системы Джонсона-Козинса. Другие ряды наблюдений астероида 2008 GO98 были выполнены в период 17 июля-27 сентября 2017 г. на 70-см телескопе АЗТ-8 наблюдательной станции Лесники Астрономической обсерватории Киевского национального университета им. Тараса Шевченко. Часть результатов этих наблюдений опубликована в работе (Borysenko et al. 2019) Изображение астероида 2008 GO98 по нашим наблюдениям приведено на рис.3.1. Дата и время наблюдений астероида в долях суток мирового времени, гелио- и геоцентрические расстояния r и Δ , фазовый угол ph (угол Солнце-астероид-Земля), время экспозиции t , количество полученных за ночь изображений N , а также использованный в наблюдениях телескоп приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Сводка наблюдений астероида 2008 GO98 в 2017 г.

Дата, UT	r , а.е.	Δ , а.е.	ph , град.	t , сек.	N		Телескоп
					V	R	
Июль, 18.92	3.31	2.41	9.6	60	20	20	АЗТ-8
Июль, 19.91	3.31	2.41	9.3	30	-	20	АЗТ-8
Июль, 30.86	3.34	2.38	7.0	60	-	30	Цейсс-1000
Август, 11.83	3.36	2.39	5.3	60	-	15	АЗТ-8
Сентябрь, 14.81	3.45	2.61	10.7	60	16	13	АЗТ-8
Сентябрь, 27.91	3.48	2.77	13.1	60	-	18	АЗТ-8

3.2. Определение координат и орбиты объекта 2008GO98 (362P)

Астрометрическая обработка наблюдений, проведенных в МАОС, была выполнена с помощью программного пакета (ПП) АПЕКС-II (Девяткин и др.

2010). В качестве опорного использован астрометрический каталог UCAC5, в котором координаты звезд приведены с астрометрической точностью около 0.03". В табл.3.3 представлены средние значения отклонений измеренных экваториальных координат (O) от каталожных данных (C), обозначенные как $(O-C)_\alpha$ и $(O-C)_\delta$ для координат δ и α , соответственно, а также их средние квадратичные ошибки σ_α и σ_δ по наблюдениям в МАОС. Как видно, средняя по всем кадрам ошибка астрометрической редукции составляет 0.05" для прямого восхождения α и склонения δ Координаты астероида, найденные из астрометрической обработки наших наблюдений приведены в табл.3.4. В графическом виде видимая траектория 2008 GO98 по наблюдениям в МАОС и по другим наблюдениям (https://www.minorplanetcenter.net_id=457175). приведена на рис.3.1, где по оси абсцисс даны α – прямое восхождение и по оси ординат δ – склонение астероида. Как видно, наши координаты вполне укладываются в видимую траекторию астероида, построенную по разным наблюдениям.

Таблица 3.3. Средние разности (O-C) и их стандартные отклонения для астероида 2008GO98 по наблюдениям в обсерватории Санглож

Дата	$(O-C)_\alpha$	σ_α	$(O-C)_\delta$	σ_δ
30.07.2017	-0.045"	0.066"	-0.051"	0.076"

Таблица 3.4. Экваториальные координаты астероида 2008GO98 по наблюдениям в обсерватории Санглож

Дата	α	δ	m, зв.вел.
07 30.91848	21 ^h 15 ^m 02 ^s .16	+03° 06' 27".6	19.3
07 30.91931	21 15 02.06	+03 06 22.2	19.3
07 30.92012	21 15 01.85	+03 06 27.1	19.5
07 30.92094	21 15 01.84	+03 06 24.7	18.1
07 30.92176	21 15 01.91	+03 06 23.9	18.3
07 30.92257	21 15 01.84	+03 06 23.9	18.4
07 30.92420	21 15 01.80	+03 06 23.4	19.2
07 30.92502	21 15 01.71	+03 06 25.7	18.7
07 30.92584	21 15 01.53	+03 06 24.9	18.6
07 30.92666	21 15 01.64	+03 06 22.8	18.7

07 30.92748	21 15 01.80	+03 06 22.9	18.6
07 30.92829	21 15 01.59	+03 06 22.6	18.4
07 30.92993	21 15 01.53	+03 06 21.5	17.8
07 30.93074	21 15 01.51	+03 06 23.4	19.2
07 30.93156	21 15 01.44	+03 06 21.2	18.7
07 30.93237	21 15 01.65	+03 06 22.9	18.7
07 30.93319	21 15 01.23	+03 06 17.9	18.7
07 30.93402	21 15 01.36	+03 06 20.8	17.6
07 30.93483	21 15 01.30	+03 06 17.9	19
07 30.93646	21 15 01.27	+03 06 20.4	18.8
07 30.93810	21 15 01.25	+03 06 19.7	18.7
07 30.93973	21 15 01.16	+03 06 18.7	18.7
07 30.94219	21 15 01.06	+03 06 18.2	18.7
07 30.94300	21 15 00.99	+03 06 19.5	18.8
07 30.94382	21 15 01.05	+03 06 18.2	18.7
07 30.94463	21 15 01.08	+03 06 18.2	19.2
07 30.94545	21 15 00.92	+03 06 17.9	17.3
07 30.94627	21 15 00.89	+03 06 18.1	19.1
07 30.94708	21 15 00.89	+03 06 18.6	19.1
07 30.94791	21 15 00.84	+03 06 17.8	19.2
07 30.94872	21 15 00.84	+03 06 17.1	19.3
07 30.94954	21 15 00.75	+03 06 17.3	18.1
07 30.95036	21 15 00.75	+03 06 16.7	19.1

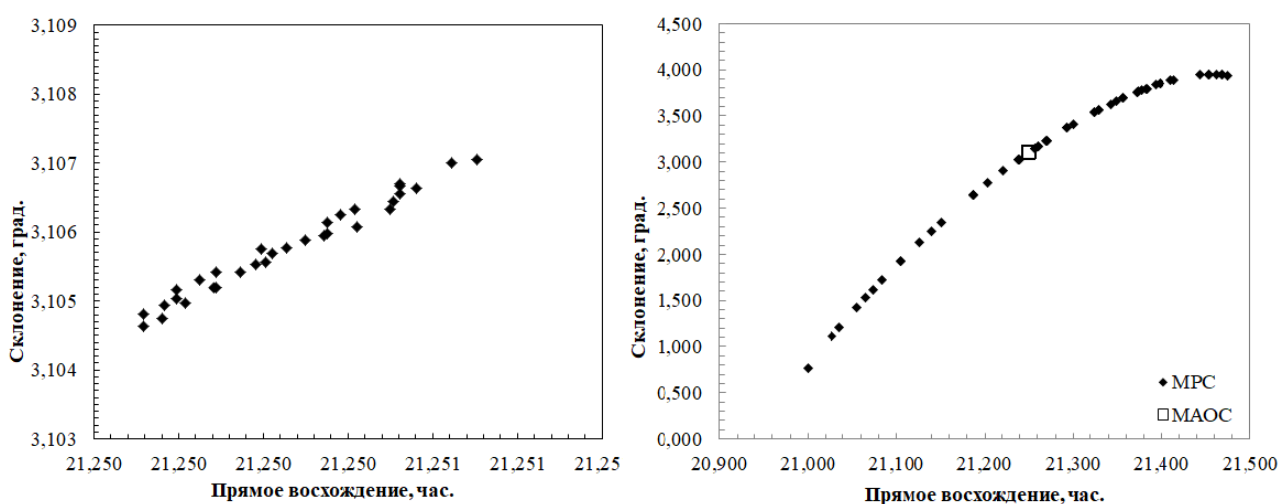


Рис.3.1. Видимая траектория астероида 2008 GO98 по наблюдениям 30.07.2017 г. на Санглохе (слева) и по данным различных наблюдений в 2017 г., имеющимся в MPC (справа).

Орбиту можно вычислить, используя измеренные координаты астероида в нескольких положениях. При малой дуге наблюдений, как правило, точность построения орбиты снижается. В таком случае, по

небольшому количеству наблюдений строится первоначальная орбита, которая потом уточняется с помощью дополнительных новых наблюдений. Учитывая, что координаты астероида определены с высокой точностью, мы попытались вычислить первоначальную орбиту 2008 GO98 по наблюдениям в МАОС с использованием ПП ЭПОС (Львов, Цекмейстер 2012). Орбита 2008 GO98 вычислена для среднего момента наблюдений МАОС с использованием 77 наблюдений. Результат приведен в табл.3.5, где даны следующие элементы орбиты в равноденствии 2000.0: e — эксцентриситет, a — большая полуось, q — перигелийное расстояние, i — наклонение, ω — аргумент перигелия, Ω — долгота восходящего узла, n — среднее суточное движение, δ — средняя квадратичная ошибка. Для сравнения в табл.2.5 приведена орбита, вычисленная на основе 672 наблюдений астероида в различных обсерваториях согласно базе данных MPC (https://www.minorplanetcenter.net_id=457175) и в последнем столбце показаны разности между данными. С учетом разных эпох, на которые приведены орбиты, орбита, вычисленная по нашим наблюдениям, имеет минимальные отклонения от орбиты, полученной по другим наблюдениям астероида. На момент наблюдений его орбита сохраняла стабильность.

Таблица 3.5. Сравнение первоначальной орбиты астероида 2008 GO98 полученной по наблюдениям обсерватории Санглох и орбиты MPC (J2000.0)

Элементы орбиты	МАОС [данная работа]	MPC [MPO 472513]	Δ
Количество положений	77	672	-
T	JD 2457954.88	JD 2457624.56	-
<i>Эпоха</i>	JD 2457965.5	JD 2458600.5	-
e	0.280182	0.280465	-0.0002831
$a, a.e.$	3.965812	3.965294	0.000518
$q, a.e.$	2.853437	2.853167	0.0002696
$i, град.$	15.566084	15.56667	-0.000586

ω , град.	53.57483	53.57407	0.00076
Ω , град.	192,609325	192,6099	-0.000595
n , град./сут.	0,12496944	0,124822	0.00014754
σ	0".52	0".69	-

Проекция орбиты 2008 GO98 на плоскость эклиптики в период нашего мониторинга показана на рис.3.2.

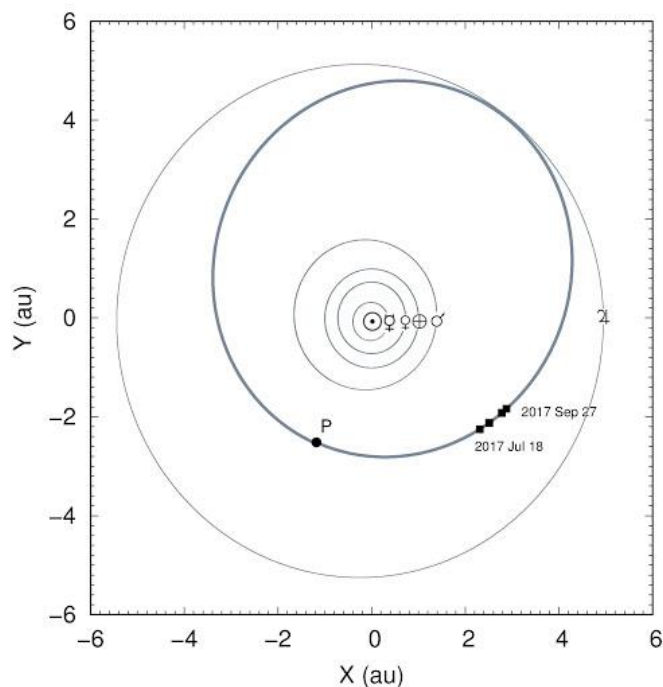


Рис 3.2. Проекция орбиты объекта 2008 GO98 (362P) на плоскость эклиптики. Звездочками отмечены наши наблюдательные данные с 17 июля по 27 сентября 2017 г. Символом «P» указано положение перигелия орбиты объекта. Для сравнения приведены также орбиты планет земной группы и Юпитера.

3.3. Определение физических свойств объекта 2008GO98 (362P)

В ходе фотометрических измерений контур астероида центрировался с использованием только центрального контура относительной интенсивности (изофоты), который был наиболее близок к максимуму яркости объекта. Для абсолютных фотометрических измерений вы брались все звезды поля, которые предварительно проверялись на переменность. Опорные звезды отождествлялись в каталоге APASS (<https://www.aavso.org/apass>), при этом

для перехода из фотометрической системы Sloan в систему Джонсона-Козинса использованы формулы перехода для фильтра R из работы (Mallama 2014). Для измерений наблюдений телескопа Цейсс-1000 использовалась апертура 7 угловых секунд (2692.21 км), наблюдения телескопа АЗТ-8 измерялись с апертурой от 16 до 9 угловых секунд (соответственно от 28023 до 18142 км). В обработке изображений и вычислении фона неба использован программный пакет системы IDL (<https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/IDL>). Таким методом были получены видимые звездные величины ядра кометы в фильтре R, среднее значение которых за ночь наблюдений 30 июля дано в табл. 3.6. В табл.3.6 также приведено среднее значение видимой звездной величины ядра по наблюдениям в Лесниках 14 сентября (Borysenko 2019). Поскольку в работе Borysenko (2019) данные измерений звездных величин ядра кометы за 18-19 июля, 11 августа и 27 сентября 2017 г. не приведены, то мы не приводим их в табл.3.6. Кривая блеска 2008 GO98 в R фильтре по наблюдениям в МАОС 30 июля 2017 г. представлена на рис.3.4, где по оси ординат отложены видимые звездные величины m и по оси абсцисс - время наблюдений в юлианских днях.

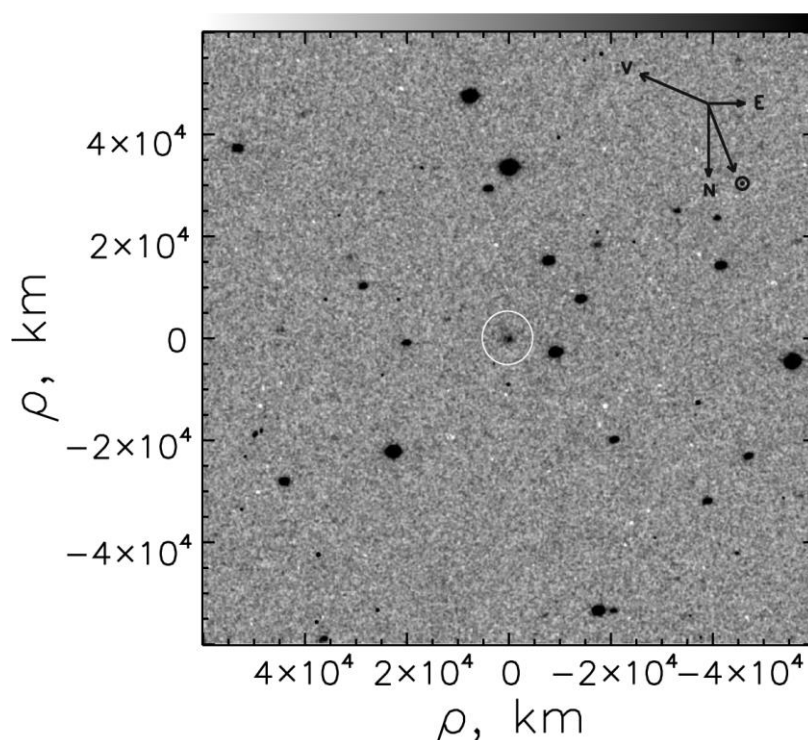


Рис.3.3. Суммарное изображение астероида 2008 GO98, полученное в фильтре R 30 июля 2017 г. в обсерватории Санглох.

Таблица 3.6. Звездная величина астероида 2008 GO98 по наблюдениям в 2017 г.

Фильтр	июль 30.86	сент. 14.81
R	18.75±0.16	19.74±0.04

В таблице 3.6 за 14 сентября приведены данные из статьи Borysenko et al. (2019), где получена звездная величина с учетом полной компенсации комы по методу Hicks et al. (2007), а наши данные за 30 июля соответствуют минимальному вкладу комы (рис. 3.3).

Исходя из этого, для расчетов абсолютной звездной величины для 2008 GO98 мы применили формулу 3.1 (Snodgrass et al. 2006, 2008), также, например, как и Garcia-Migani & Gil-Hilton (2018)

$$m_a(1,1,0) = m_a - 5 \log(r\Delta) - \beta\alpha, \quad (3.1)$$

здесь $m_a(1,1,0)$ – блеск гипотетической точки на единичном гелиоцентрическом и геоцентрическом расстояниях с фазовым углом $ph=0$ град., m_a – измеренный блеск, r и Δ – гелио- и геоцентрическое расстояния кометы в а.е., α – фазовый угол (ph) в градусах, β – фазовый коэффициент в звездных величинах на градус; индекс a означает какой-либо фильтр. Для фазового коэффициента использовано общепринятое значение $\beta=0.035$ зв.вел./град. (Lamy et al. 2004). Абсолютный блеск астероида в фильтре R (средние значения за две ночи) приведен в табл.3.7.

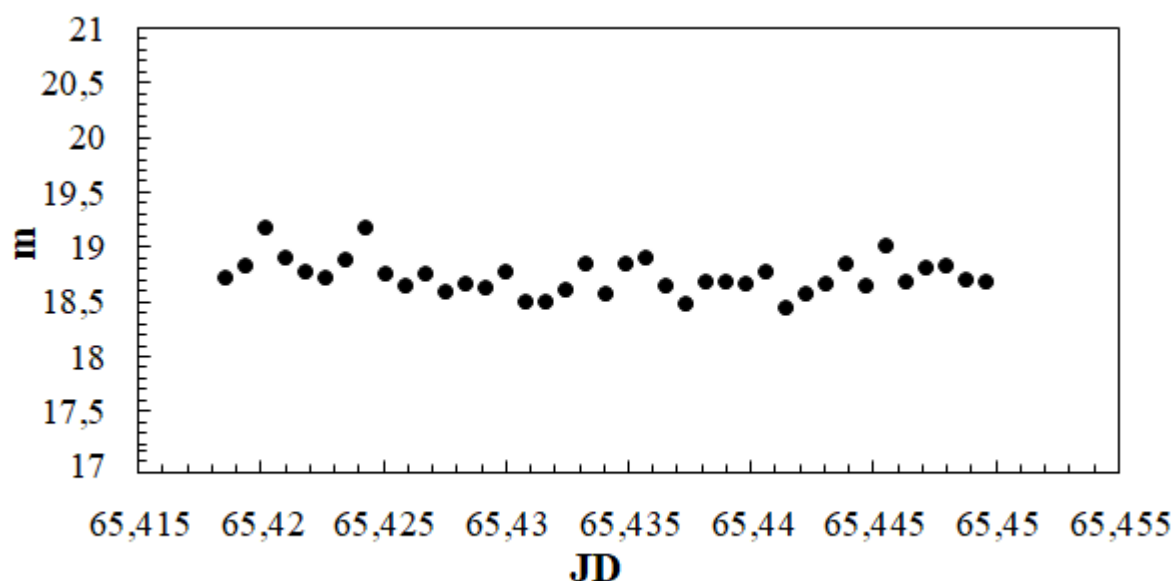


Рис. 3.4. Кривая блеска в фильтре R астероида 2008 GO98 по наблюдениям в обсерватории Санглох 30 июля 2017 г.

Таблица 3.7. Абсолютные звездные величины и диаметр астероида 2008 GO98

Дата 2017, UT	r , а.е.	Δ , а.е.	α , гра д.	$m_R(1,1,0)$, зв.вел.	D , км
Июль, 30.86	3.34	2.38	7.0	13.97 ± 0.16	7.0 ± 2.0
Сентябрь, 14.81	3.45	2.61	10.7	14.53 ± 0.04	6.4 ± 1.0

Фотометрические данные (табл.3.6-3.7) показывают, что проведенный мониторинг пришелся на период активности астероида, об этом свидетельствуют звездные величины, измеренные в фильтре R в июле-сентябре 2017 г. (Borysenko 2019). После высокой активности в июле 2017 г. абсолютный блеск объекта 2008 GO98 к сентябрю постепенно снижался. На основании этого можно сказать, что в сентябре 2017 г. объект продолжал находиться в активном состоянии, но значительно ослабленном.

Как было отмечено, имеются значительные расхождения в оценках эффективного диаметра объекта. Поэтому необходимо оценивать диаметр по

новым наблюдениям, для уточнения размера и полноценного анализа состояния объекта на момент этих наблюдений. Для определения диаметра D объекта 2008 GO98 использованы измерения его блеска в фильтре R и следующее соотношение между измеренным в фильтре R видимым блеском m_R и эффективным радиусом ядра кометы r_N в метрах (Russel 1916, Jewitt et al. 2009, Solontoi et al. 2012)

$$A_R r_N^2 = 2.238 \cdot 10^{22} r^2 \Delta^2 10^{0.4(m_\odot - m_R + \beta\alpha)}, \quad (3.2)$$

или, когда определен абсолютный блеск в фильтре R $m_R(1,1,0)$, радиус вычисляется по упрощенной модификации формулы (3.3)

$$A_R r_N^2 = 2.238 \cdot 10^{22} 10^{0.4(m_\odot - m_R(1,1,0))}, \quad (3.3)$$

где A_R – геометрическое альbedo и $m_\odot = -27.29$ зв.вел. видимый блеск Солнца (Cox, Pilachowski 2000), причем обе величины в фильтре R . Результаты оценки диаметра объекта, найденные по наблюдениям на Санглохе и с величиной альbedo $A_R=0.057$ приведены в табл. 3.7. Здесь же приведен диаметр, вычисленный с использованием наблюдений 14 сентября, когда наблюдалась минимальная фаза активности объекта и альbedo, было принято равным 0.04 (Borysenko 2019). Как видно, оценка эффективного диаметра по нашим измерениям варьирует от 6.4 до 7 км, с учетом ошибок измерений, выполненных в момент активности 2008 GO98, и принятой величины альbedo можно заключить, что по нашим наблюдениям подтвержден имеющийся нижний предел оценки эффективного диаметра объекта 5.5 км (<https://www.asteroidanalytics.com/2008go98/>). Отметим, что для наблюдений комет, находящихся в активном состоянии, т.е. с доминирующим вкладом комы в суммарную составляющую излучения, оценки диаметра ядра могут быть рассмотрены только как верхний предел размера.

3.4. Пылепроизводительность объекта 2008 GO98 (362P)

Уровень активности кометы можно оценить количественно, используя параметр Afc , который теоретически независим от времени и места наблюдений, а также выбранной апертуры измерений (A'Hearn et al. 1984).

Параметр Afc может быть определен с помощью звездной величины по следующему выражению (A’Hearn et al. 1984)

$$Afc = \frac{4r^2 \Delta^2 10^{0.4(m_{\odot} - m_a)}}{\rho}, \quad (3.4)$$

где A – альbedo, f – коэффициент заполнения апертуры поля зрения, c – проекция радиуса фотометрической апертуры на небесную сферу в см, $m_{\odot}$ и m_a – видимые звездные величины Солнца и кометы, соответственно, в определенном фильтре, r – гелиоцентрическое расстояние объекта в а.е. и Δ – геоцентрическое расстояние в см. Для наблюдений, полученных на телескопе Цейсс-1000, параметр Afc вычислен с использованием изображений, полученных в фильтре R , и радиусом проекции апертуры $\rho=2692.21$ км (7 угл. сек). Полученное значение вместе с ошибкой приведено в табл.2.9, где также дана величина параметра, найденная из наблюдений, полученных на телескопе АЗТ-8 14 сентября с радиусом апертуры $\rho=28023$ км (16 угл. сек) (Borysenko 2019). Величины параметра пылепродуктивности постепенно снижаются к концу периода наблюдений, что также является показателем убывания активности объекта. Отметим, что имеется тенденция уменьшения этого параметра также и с увеличением гелиоцентрического расстояния.

Таблица 3.8. Измеренные величины параметра Afc

Дата 2017, UT	r , а.е.	Δ , а.е.	α , град.	$m_R(1,1,0)$, зв.вел.	Afc , см
Июль, 30.86	3.34	2.38	7.0	13.97 ± 0.16	81 ± 16
Сентябрь, 14.81	3.45	2.61	10.7	14.53 ± 0.04	51 ± 11

3.5. Морфология комы

Анализ суммарных изображений объекта 2008 GO98 показал наличие значительной пылевой комы вокруг ядра, зарегистрированной 18 и 30 июля 2017 г. (рис. 3.5a,b,c). Более того, здесь четко видна протяженность комы в сторону противоположную направлению к Солнцу. По наблюдениям 14

сентября на рис.3.5с видно, что ядро окружено уже гораздо более слабой рассеянной пылевой комой и практически отсутствует какая-либо ее вытянутость. Можно заключить, что к этому моменту активность астероида значительно ослабла, на что также указывают данные табл.3.6-3.7.

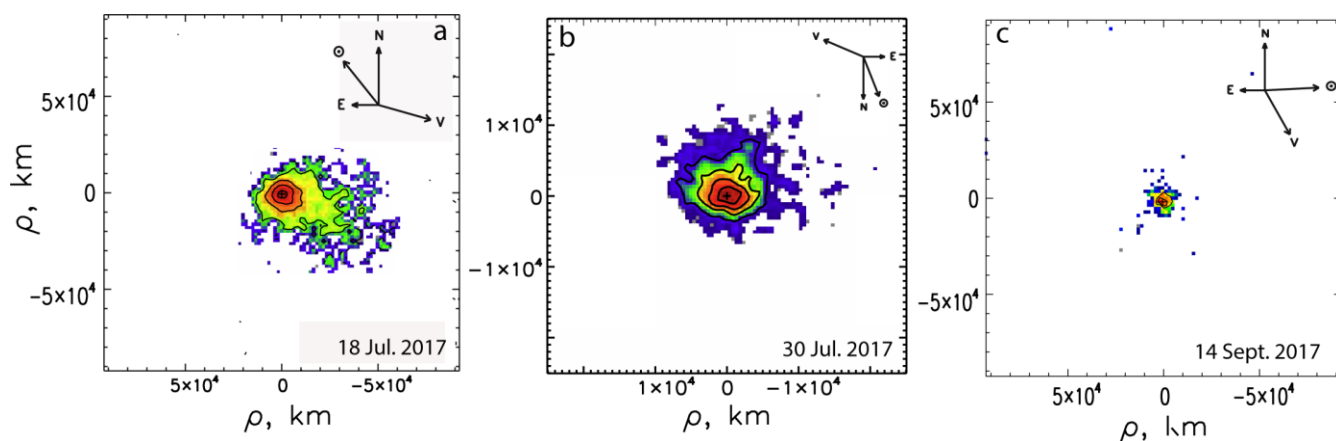


Рис 3.5. Суммарные изображения 2008 GO98 в фильтре R , полученные 18 июля (a), 30 июля (b) и 14 сентября 2017 г. (c). На рисунках указаны направления на Север, Восток, к Солнцу и отрицательный вектор скорости.

3.6. О природе двойственного объекта 2008 GO98 (362P)

Прежде чем обсудить возможную природу 2008 GO98 необходимо привести некоторые пояснения. В работе Weissman (2002) предложены следующие определения для описания существующих объектов кометной природы. Неактивной кометой называют ядро кометы, которая активна в некоторой части своей орбиты, но в настоящее время она находится в той части орбиты, где потери летучестей незначительны и нет видимой комы. Термином «спящая» комета обозначено ядро кометы, которая когда-то была активной и потом утратила способность генерировать кому, видимую в любой части ее нынешней орбиты. «Спящая» комета может быть реактивирована, когда она перебрасывается вследствие возмущений на меньшее перигелийное расстояние. Или реактивация возможна, если в результате столкновения с другим телом удаляется поверхностная тугоплавкая кора и свежие ледяные субстанции начинают сублимировать с поверхности, увлекая за собой пылевые частицы (Weissman 2002). Теперь

вернемся к двойственному объекту 2008 GO98 (362P). Кометоподобная орбита, низкое значение альбедо и зарегистрированная активации объекта в 2017 г. указывают на кометную природу объекта. Поскольку впервые кометная активность зарегистрирована в июле 2017 г. и не была обнаружена в 2008-2009 гг., когда в период очередного прохождения перигелия астероид был открыт, и даже ранее в 2001-2002 гг., когда астероид также проходил перигелий орбиты, можно сделать вывод, что с очень высокой вероятностью, объект может быть неактивной кометой или «спящей» кометой. В прошлом эта комета принадлежала семейству Юпитера, ныне, в связи с перемещением в другую область расположения в результате гравитационных возмущений Юпитера, объект относится к семейству комет квази-Хильды. Реактивация такой кометы в 2017 г. была возможна по вышеприведенным причинам. Кроме того, в (Williams et al. 2010) показано, что в состав ядра комет входит особая нестабильная форма водяного льда, в котором молекулы воды соединились друг с другом хаотическим образом. Это так называемый аморфный лед, который и неупорядочен, и нестабилен. С повышением температуры и достижением критического порога -133°C , такой лед спонтанно возвращается в привычную форму. Отметим, что активные объекты Главного пояса, расположенные на расстояниях около 3 а.е., имеют температуру формирования около 150 К или -125°C (Masiero et al. 2012). Гелиоцентрическое расстояние 2008 GO98 в период наблюдений составляло 3.3 а.е., где и достигается критическая температура. При переходе аморфного льда в кристаллический лед меняется структура вещества, и пузырьки газа, включенные в большом количестве в аморфный лед в процессе его застывания, в один момент высвобождаются. Летучести, замороженные в аморфный лед, сублимируют сквозь микро - и макротрещины, в изобилии пронизывающие хаотичную структуру аморфного льда. Во время приближения к Солнцу именно этот процесс может произойти в «спящей» комете (Williams et al. 2010).

Выводы по главе III

По результатам квазисинхронных оптических наблюдений двойственного объекта 2008 GO98, проведенных в Международной астрономической обсерватории Сангloch Института астрофизики НАНТ и в Астрономической обсерватории Киевского национального университета им. Т. Шевченко в июле-сентябре 2017 г. зарегистрирован признак кометной активности в виде пылевой комы и хвоста, наличие которых подтвердили результаты исследования морфологии изображений. Определены экваториальные координаты астероида, приемлемая точность астрометрических измерений позволила вычислить орбиту, элементы которой согласуются с имеющимися орбитальными данными. Активность астероида не повлияла на стабильность орбиты. Определены видимые и абсолютные звездные величины астероида в фильтре R, показано постепенное их снижение в период наблюдений - от 13.97 до 14.53 абсолютных звёздных величин, что свидетельствует об убывании активности к концу мониторинга. Оценка эффективного диаметра астероида по нашим наблюдениям 6.4-7 км согласуется с имеющимися данными. Кометоподобная орбита, низкое значение альбедо и зарегистрированная активации объекта в 2017 г. указывают на кометную природу объекта. 2008 GO98 с высокой вероятностью является угасшим кометным ядром, реактивация которого в 2018 г., по-видимому, произошла в результате столкновения с другим телом. Для большей уверенности необходимо продолжить мониторинг и исследование объекта.

ГЛАВА IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ КОМЕТ 29P/ШВАССМАНА-ВАХМАНА 1 и P/2019 LD2 (ATLAS)

4.1. Комета 29P/Швассмана-Вахмана 1 из группы кентавров и результаты ее фотометрических наблюдений

Комета 29P/Швассмана-Вахмана 1 является одним из самых известных активных объектов Солнечной системы, который относится к группе кентавров. Предполагается, что кентавры являются объектами, переброшенными из пояса Койпера во внутреннюю область планетной системы, где для наземных наблюдений они проявляются как короткопериодические кометы (Jewitt, Luu 1998, Levison, Duncan 1997). В этом смысле кентавры с научной точки зрения интересны как близкие, т.е. более яркие и доступные для изучения образцы объектов пояса Койпера. К настоящему моменту известны более 45 таких объектов, являющихся ледяными телами и располагающимися между орбитами Юпитера и Нептуна.

Актуальность изучения комет из группы кентавров, заключается в том, что в настоящее время исследовано лишь небольшое количество таких объектов. Механизмы, ответственные за проявление кометной активности на удаленных гелиоцентрических расстояниях (более 3 а.е.), до сих пор доподлинно не установлены. Особый интерес представляет изучение состава льдов их ядер и его сравнение с составом ядер долгопериодических комет, источником которых считается облако Оорта (Jewitt, Luu 1992). В этой связи изучение вспышечной активности кометы 29P является хорошей возможностью получить определенные сведения необходимые для решения имеющейся проблемы.

Новая комета была открыта 15 ноября 1927 года в Гамбургской обсерватории в Германии. В честь первооткрывателей она получила название комета 29P/Швассмана-Вахмана 1, далее по тексту 29P. Период обращения кометы вокруг Солнца равен 14.6 годам, и она наблюдалась в течение нескольких проходов перигелия. Кроме того, для 29P параметр

Тиссерана относительно Юпитера имеет значение $T_J=2.984$ (<https://cneos.jpl.nasa.gov>). Эти факты позволили считать 29P короткопериодической кометой. Однако в дальнейшем выявлен новый класс малых тел, названных кентаврами, куда относятся объекты, у которых и перигелийное расстояние q и большая полуось a орбит расположены между орбитами Юпитера (на гелиоцентрическом расстоянии 5.2 а.е.) и Нептуна (на расстоянии 30 а.е.), а также этим объектам присущи хаотические орбиты (Jewitt, Luu 1998, Jewitt, Kallas 1998). Оказалось, что перигелийное расстояние и большая полуось орбиты 29P удовлетворяют этому условию, и поэтому комета была отнесена к группе кентавров (Jewitt, Kallas 1998). Орбита кометы 29P находится за пределами орбиты Юпитера, расположенной на гелиоцентрическом расстоянии 5 а.е., отметим, что это расстояние в Солнечной системе принято считать условной границей т.н. «снеговой линией», начиная с которой температура становится достаточной низкой для того, чтобы твердое состояние воды и других летучих соединений было стабильным даже под воздействием прямых солнечных лучей (Jewitt 2015). Элементы орбиты кометы 29P, приведены в табл. 4.1, где, a – большая полуось, e – эксцентриситет, q , Q – перигелийное и афелийное расстояния, i – наклонение, ω – аргумент перигелия, Ω – долгота перигелия (ssd.jpl.nasa.gov, дата обращения 9 ноября 2021 г.).

Таблица 4.1. Элементы орбиты кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 (J2000.0)

Эпоха	a , а.е.	e	q , а.е.	Q , а.е.	i , град.	ω , град.	Ω , град.
05.03.2012	5.998	0.044	5.734	6.262	9.379	50.464	312.573

Динамические свойства свидетельствуют о двойственном характере кометы 29P. Эксцентриситет орбиты кометы составляет всего 0.045, и она движется вокруг Солнца по почти круговой орбите, нехарактерной для комет – такие орбиты обычно имеют астероиды и планеты. Астероидальный тип

орбиты кометы подтверждает и постоянная Тиссерана, имеющая для ее орбиты величину $T_j=2.984$ (<https://ssd.jpl.nasa.gov>).

О двойственности кометы говорят и ее физические свойства, найденные по наземным наблюдениям. Известно, что для кометных ядер значение альбедо, как правило, находится в пределах от 0.02 до 0.12, среднее значение составляет 0.07 (Jewitt 1992). Геометрическое альбедо 29P, найденное из фотометрии в видимом спектральном диапазоне, составляет $p_V=0.13$ (Cruikshank, Brown 1983), и, если это корректные измерения, альбедо является совершенно нетипичным для кометного ядра. В то же время, эта величина альбедо свойственна объектам группы кентавров (Barucci et al. 2004). Отметим, что по величине альбедо 29P имеется много публикаций, в которых даны различные оценки, заключающиеся в пределах от 0.02 до 0.17 в различных диапазонах излучения. В частности, согласно данным (<https://ssd.jpl.nasa.gov>) для геометрического альбедо ядра кометы приведено значение 0.033.

С таким расхождением в значениях альбедо связан и большой разброс в имеющихся оценках эффективного размера ядра кометы 29P, поскольку для определения диаметра используется величина альбедо. Различные оценки радиуса, найденные с использованием видимых звездных величин кометы по наземным наблюдениям и в предположении альбедо 0.04 заключены в пределах от 21 до 52 км (Lamy et al. 2015). В работе Cruikshank, Brown (1983) с использованием найденного значения альбедо 0.13 радиус ядра кометы оказался равным 20 км, при этом отмечено, что если определение альбедо основано на оценках видимой яркости, то размер основан на измерениях теплового излучения объекта. По измерениям суммарного сигнала от ядра и комы кометы с апертурами разных размеров и в предположении альбедо в фильтре R $p_R=0.04$ получена оценка среднего радиуса 15.4 км (Meech et al. 1993). Использование величины альбедо 0.13 уменьшает это значение радиуса до 8.6 км (Lamy et al. 2004).

Для периода вращения кометы также имеется несколько оценок, 14.0 ч. (Meech et al. 1993), 10 ч. (Luu, Jewitt 1993), причем последние авторы определили вторичный период как 32.2 ч. подразумевая полное положение вращения. В работе (Иванова и др., 2012) по наблюдениям 2008-2009 гг. получена оценка периода вращения 11.7-12.1 ч. Согласно базе данных CNEOS (2019) общая абсолютная яркость кометы составляет $M1=6.0^m$ зв. вел., диаметр $D=60.4$ км.

С момента открытия комета 29P стала известной своими периодическими вспышками блеска. В 2017 г. 29P в очередной раз проявила вспышечную активность и стала доступной для наблюдений. 28 июля – 1 августа 2017 г. нами проведены наблюдения 29P на телескопе Цейсс-1000 Международной астрономической обсерватории Санглох Института астрофизики НАНТ. Регистрация объекта выполнялась с помощью ПЗС камеры FLI 16803 серии ProLine с использованием широкополосных фотометрических фильтров BVRI системы Джонсона-Козинса, при этом экспозиции составляли 60 секунд. Характеристики телескопа и матрицы ПЗС камеры во время наблюдений являлись аналогичными с приведенными выше. Были получены кадры «Dark», «Flat» «Bias», которые также использовались в первичной обработке кадров. Во время наблюдений в МАОС было получено более 500 изображений объекта, использованных в обработке. Положение орбиты кометы во время мониторинга и детали выполненных экспозиций приведены в табл. 4.2, где r и Δ - расстояния кометы от Солнца и Земли, ph - фазовый угол, PA – позиционный угол направления на Солнце, N и t – количество и время экспозиций. Изображение кометы во время наблюдений приведено на рис.4.1.

Таблица 4.2. Журнал наблюдений кометы 29P/Швассмана - Вахмана 1
в обсерватории Санглох

Дата	r ,	Δ ,	PA ,	ph ,	N	t , с
------	-------	------------	--------	--------	-----	---------

	<i>a.e.</i>	<i>a.e.</i>	<i>град.</i>	<i>град.</i>	<i>Фильтр</i>	
					MAOC	
28.07.2017	5.829	4.842	67.6	2.583	10xV, 20xR, 10xI	60
29.07.2017	5.828	4.838	67.2	2.403	8xV, 11xR, 11xI	60
30.07.2017	5.828	4.834	66.8	2.223	30xB, 33xV, 30xR, 30xI	60
31.07.2017	5.828	4.831	66.2	2.042	40xB, 40xV, 40xR, 40xI	60
01.08.2017	5.828	4.828	65.7	1.860	20xB, 20xV, 20xR, 20xI	60

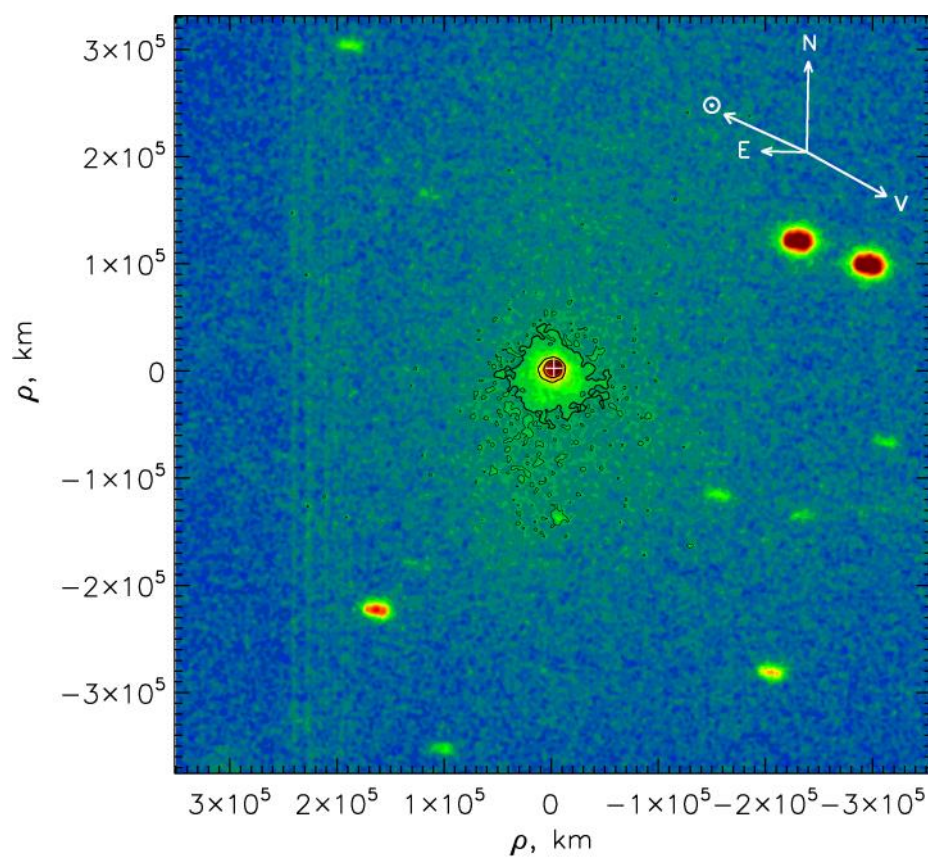


Рис.4.1. Суммарное изображение кометы 29Р в фильтре R, полученных 30 июля 2017 г., телескоп Цейсс-1000 МАОС, экспозиция 1800 сек.

4.1.1. Определение физических свойств кометы 29P/Швассмана-Вахмана

1: блеск, показатели цвета, диаметр

Фотометрическая обработка выполнена по вышеприведенной стандартной процедуре. Для определения видимых звездных величин кометы использовались звезды сравнения из каталога APASS, для которых блеск определен с точностью равной 0.03^m (Henden et al. 2016). Фотометрические измерения выполнены апертурой с радиусом 3 угловых сек., что соответствует радиусу проекции на картинную плоскость объекта, ~ 10518 км. Средние значения видимых звездных величин объекта, полученные в разных фильтрах, для каждой ночи наблюдений даны в табл. 3.3. Кривая блеска 29P, построенная по наблюдениям 1 августа, представлена на рис.3.2, где по оси ординат отложены видимые звездные величины m в фильтрах $BVRI$ и по оси абсцисс - дата наблюдений в юлианских днях.

Таблица 4.3. Видимые звездные величины m кометы 29P по наблюдениям в
MAOC

Фильтр	28.07.2017	29.07.2017	30.07.2017	31.07.2017	01.08.2017
B	-	-	17.78 ± 0.05	17.77 ± 0.02	17.75 ± 0.04
V	16.88 ± 0.04	16.91 ± 0.05	16.92 ± 0.05	16.97 ± 0.04	16.92 ± 0.04
R	16.29 ± 0.04	16.41 ± 0.04	16.45 ± 0.05	16.50 ± 0.04	16.33 ± 0.04
I	15.69 ± 0.03	15.83 ± 0.05	15.92 ± 0.05	16.05 ± 0.02	15.82 ± 0.04

Видимые звездные величины m_a конвертировались в абсолютные звездные величины ядра кометы $m_a(1,1,0)$ с использованием эмпирического уравнения (3.1). Найденные таким путем абсолютные звездные величины кометы в фильтрах $BVRI$ (средние значения за пять ночей) приведены в табл. 4.4. Зависимость абсолютных величин кометы, обозначенных на графике H , от даты наблюдений (в юлианских днях) в MAOC приведена на рис. 4.3. Как видно, в период мониторинга абсолютные звездные величины кометы практически были постоянными.

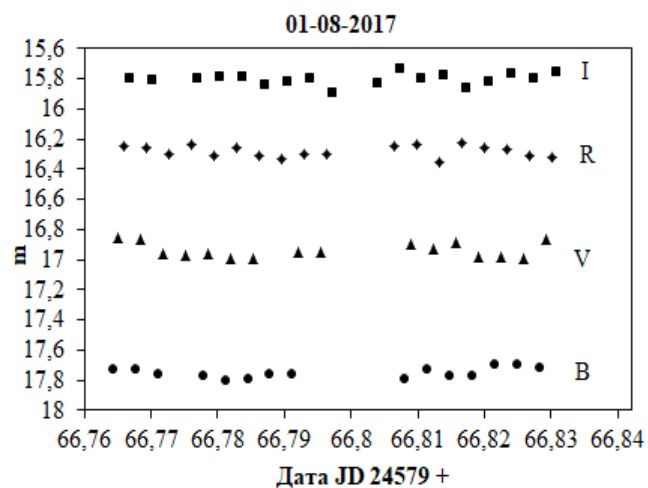


Рис.4.2. Видимые звездные величины 29Р в фильтрах *BVRI* по наблюдениям в МАОС 1 августа 2017 г.

Таблица 4.4. Абсолютные звездные величины $m_a(1,1,0)$ кометы 29Р по наблюдениям в МАОС

Фильтр	28.07.2017	29.07.2017	30.07.2017	31.07.2017	01.08.2017
B	-	-	10.45±0.05	10.45±0.02	10.45±0.02
V	9.54±0.04	9.57±0.05	9.60±0.05	9.65±0.03	9.61±0.04
R	8.95±0.04	9.07±0.04	9.13±0.04	9.18±0.04	9.01±0.02
I	8.19±0.03	8.50±0.04	8.59±0.04	8.73±0.02	8.51±0.04

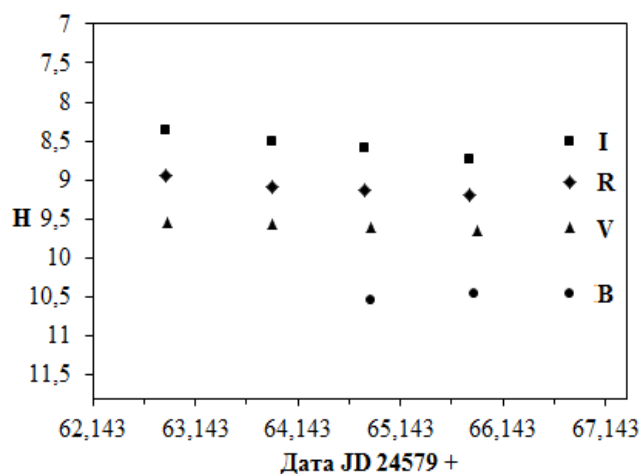


Рис.4.3. Абсолютные звездные величины H (средние значения) кометы 29P в фильтрах $BVRI$ по наблюдениям в МАОС.

Показатели цвета кометы по нашим наблюдениям (колор-индекс), а также средние значения для других объектов Солнечной системы – активных комет семейства Юпитера (active JFC), активных долгопериодических комет (active LPC), объектов пояса Койпера (Kuiper belt objects), активных и неактивных объектов группы кентавров (active and inactive Centaurs) приведены в табл.3.4. Как видно, показатели цвета кометы 29P по наблюдениям в МАОС хорошо согласуются со средними показателями цвета для активных объектов группы кентавров и объектов пояса Койпера. Колор-индексы указывают на сдвиг максимума излучения в красную часть спектра, что предполагает преобладающую роль пылевых частиц в образовании комы. По наблюдениям активности кометы в 2002-2007 также сделан вывод, что кома 29P непрерывно пополняется мелкой пылью, отделяемой с поверхности ядра (Trigo-Rodriguez et al. 2008). Более того, систематичность этого процесса подтверждают наблюдения космического телескопа Spitzer, с помощью которого зарегистрированы джеты в период отсутствия вспышек кометы (Stansberry et al. 2019).

Таблица 4.4. Показатели цвета кометы 29P в сравнении с данными для различных объектов Солнечной системы

Колор-индекс	29P, данная работа, 2017 г.					Active JFC		Active LPC	Kuiper belt objects	Centaurs objects [Solontoi et al.2012]		Солнце
	28.07	29.07	30.07	31.07	01.08	[Jewitt 2015]	[Solontoi et al.2012]	[Solontoi et al.2012]	[Solontoi et al.2012]	Active	Inactive	[Holmberg et.2012]
B-V	-	-	0.85	0.80	0.84	0.74	0.75	0.78	0.93	0.80	0.93	0.64
V-R	0.59	0.50	0.47	0.47	0.60	0.46	0.47	0.47	0.57	0.50	0.55	0.35
R-I	0.76	0.57	0.54	0.45	0.50	0.44	0.43	0.42	-	0.57	0.45	0.33

B-R	-	-	1.32	1.27	1.44	1.10	1.22	1.23	1.52	1.29	1.30	0.99
-----	---	---	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Для оценки размера ядра кометы использовано эмпирическое соотношение (2.2) между измеренными в фильтре V видимыми звездными величинами m_V и эффективным радиусом ядра кометы r_N в метрах (Solontoi et al. 2012), или, когда определен абсолютный блеск в фильтре V $m_V(1,1,0)$, радиус вычисляется по упрощенной модификации соотношения (2.2), по формуле (2.3). Поскольку величина альбедо кометы 29P точно не установлена, то для определения диаметра мы использовали два его значения 0.13 и 0.03. Результаты оценки диаметра ядра кометы приведены в табл.4.5.

Как было отмечено, имеется оценка радиуса ядра в пределах от 21 до 52 км в предположении $A=0.04$ (Kresak 1982). Согласно Barucci et al. (2004) оценка радиуса ядра составляет 20 км при $A=0.13$. По нашим измерениям, оценка диаметра заключена в пределах 43.3-45.7 км при $A=0.13$ и 86.7-91.4 км при $A=0.033$, что вполне соответствует имеющимся данным. Для уточнения размера необходимо продолжить наблюдения кометы.

Таблица 4.5. Оценка размера ядра кометы 29P по наблюдениям в МАОС в 2017 г.

Дата	r , а.е.	Δ , а.е.	ph , град.	m_V , зв.вел.	$m_V(1,1,0)$, зв.вел.	D , км ($A=0.13$)	D , км ($A=0.033$)
28.84	5.829	4.842	2.583	16.88±0.04	9.54±0.04	45.87±0.08	91.05±0.08
29.88	5.828	4.838	2.403	16.91±0.05	9.57±0.05	45.08±0.08	85.47±0.08
30.77	5.828	4.834	2.223	16.92±0.05	9.60±0.05	44.55±0.08	86.38±0.08
31.85	5.828	4.831	2.042	16.97±0.04	9.65±0.03	43.52±0.08	86.39±0.08
01.76	5.828	4.828	1.860	16.92±0.04	9.61±0.04	44.27±0.08	87.86±0.08

4.1.2. Морфология комы кометы 29P

Как было отмечено, комета 29P проявляет вспышечную активность с большим количеством структур в коме (Иванова и др.2009, Ivanova et al. 2016, Berman, Whipple 1928a, Trigo-Rodriguez et al.2010). Мы предприняли попытку обнаружения какой-либо структуры в коме кометы. Для этого к нашим данным, полученным с помощью фильтров R и I , мы применили усовершенствованный метод выделения низко контрастных структур в кометной коме. Перед применением фильтрации изображения были очищены от звезд поля вокруг кометного ядра и комы. В качестве цифрового фильтра мы использовали алгоритм Ларсона-Секанины (Larson, Sekanina 1984). На рис. 4.4 показаны первоначальные и обработанные с использованием цифрового фильтра изображения, полученные 30 июля 2017 г. Для того чтобы оценить, являются ли выявленные признаки реальными или нет, мы применили цифровые фильтры к каждому отдельному снимку кометы, а также к соответствующему ему составному изображению. Как видно из рис. 4.4, кома кометы является более конденсированной в R фильтре, чем в фильтре I . Поперечник яркой комы составляет около 5000 км, хотя в северном направлении кома заметно вытянута. После обработки изображений цифровым фильтром в коме кометы 29P наблюдаются две пылевые структуры, которые можно увидеть поперек изображений по направлению к Солнцу и в обратном направлении - от Солнца. Об обнаружении слабых или низкоконтрастных пылевых структур (джетов или оболочек) в коме кометы 29P по наблюдениям объекта на гелиоцентрических расстояниях более 5 а.е. уже сообщалось в работах (Иванова и др.2009, Ivanova et al. 2016). Там же отмечалась и направленность таких структур в сторону Солнца и в обратном направлении. Наши наблюдения и, как результат, выявленная морфология комы кометы 29P, вновь подтверждают способность таких объектов проявлять активность на сравнительно больших гелиоцентрических расстояниях, механизм которой будет рассмотрен в следующих параграфах.

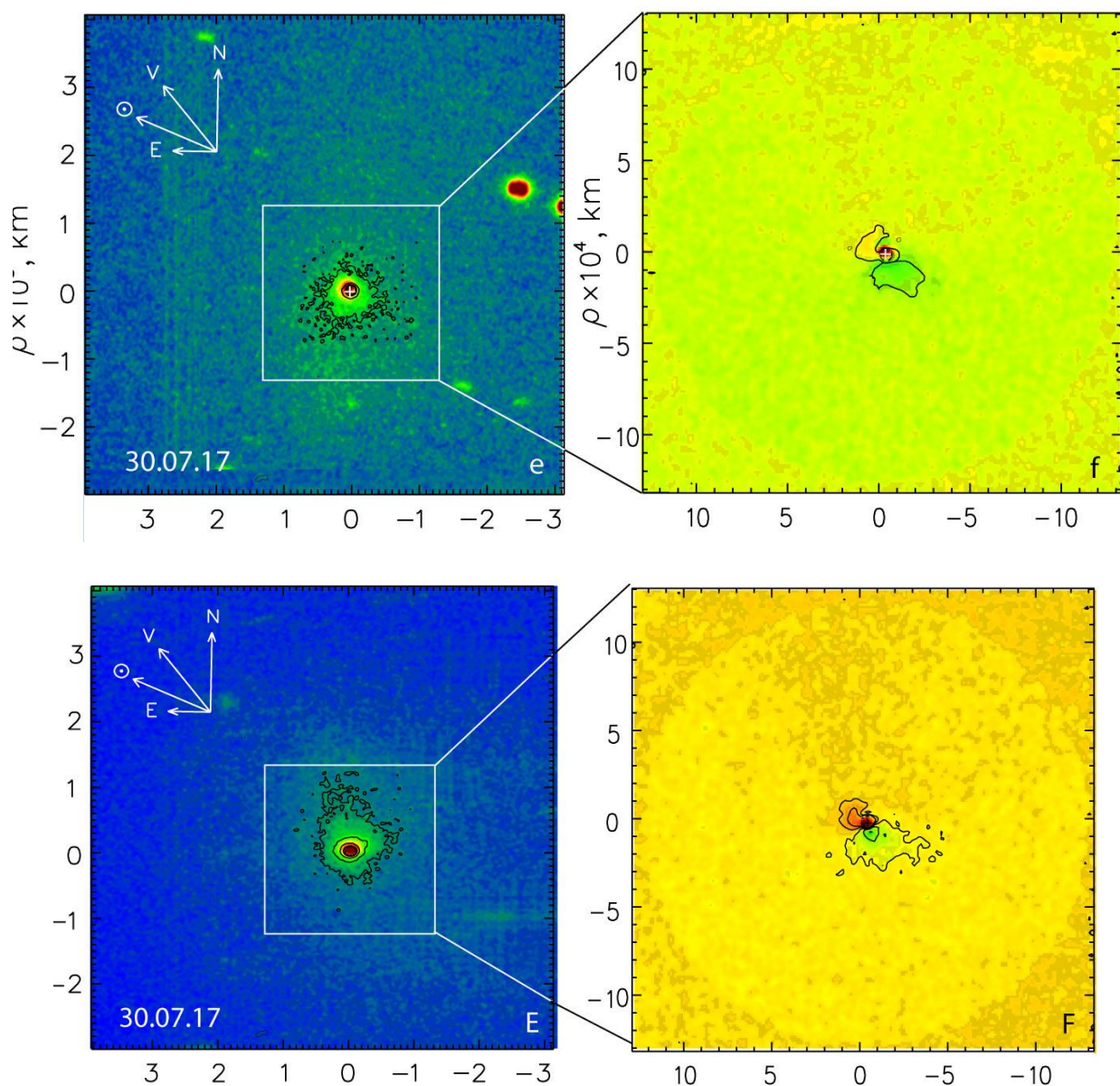


Рис. 4.4. Изображения кометы 29P в R и I фильтрах, полученные 30 июля 2017 года. Кадры e и E показывают прямые изображения 29P в относительной интенсивности в R и I фильтрах, соответственно. Кадры f и F представляют интенсивность в цифровых фильтрах (Larson, Sekanina 1984, Samarasinha, Larson 2014). Северное (N), восточное (E) и солнечное (☉) направления, а также направление вектора скорости (V) указаны на каждом прямом кадре.

4.1.3. Результаты наблюдений кометы 29P в 2021 г.

4.1.3.1. Блеск и показатели цвета

Осенью 2021 г. весь мир облетела весть об очередной вспышечной активности кометы 29P. Нами проведены ее наблюдения на телескопе Цейсс-1000 обсерватории Санглох в течение двух ночей 1-2 октября. Регистрация объекта выполнялась с использованием фотометрических фильтров *BVR*, при этом экспозиции составляли 5-10 секунд. Получено почти 450 кадров, их первичная обработка проводилась по стандартной вышеприведенной процедуре. Масштаб снимков составил 0.29"/пиксел. Положение орбиты кометы во время мониторинга и детали выполненных экспозиций приведены в табл.1, где r и Δ - расстояния кометы от Солнца и Земли, α - фазовый угол (www.minorplanetcenter.com, 2021), $PsAMV$ – направление против движения кометы, $PsAng$ – направление Солнце – объект (противосолнечное направление), N и t – количество и время экспозиций. Величины $PsAMV$ и $PsAng$ рассчитаны с помощью интернет-сервиса (www.minorplanetcenter.com, 2021).

Таблица 4.6. Журнал наблюдений кометы 29P в обсерватории Санглох в 2021 г.

Дата, 2021	Фильтр	$N \times t$, с	r , а.е.	Δ , а.е.	α , град.	$PsAMV$, град.	$PsAng$, град.
01 октября	B	64×10	5.918	5.475	9.0	269	260
	V	63×5					
	R	63×5					
02 октября	B	86×10	5.918	5.460	9.0	269	260
	V	88×5					
	R	84×5					

Первичная обработка и сложение снимков проведено с использованием программного обеспечения Astroart 4.0 (<http://www.msb-astroart.com/>, 2021). Для апертурной фотометрии кометы и опорных звезд использовалась утилита ATV под IDL для Windows (Barth 2001). Для отождествления опорных звезд использовался каталог APASS (DR9) (Henden et al. 2016), детали которого приведены в §4.1.1. Для перехода от r' к R_c звездным величинам использовалась формула из Munari et al. (2014). Фотометрические

стандарты от 13 до 16 зв. величины в количестве 5 звезд сравнения отбирались для каждой ночи наблюдений при помощи онлайн сервиса Aladin (<http://www.aladin.u-strasbg.fr>, 2021). Комета была очень яркой во время мониторинга, поэтому измерения изображений выполнены апертурой радиусом $\rho=5''$, проекция которого на картинную плоскость объекта соответствует 21486 км, последняя величина рассчитана по соотношению $\rho=\Delta \cdot \text{tg}(\rho)$. Средние значения видимых звездных величин кометы, полученные в разных фильтрах, для каждой ночи наблюдений даны в табл. 2.

Таблица 4.7. Видимый m и абсолютный $m_a(1,1,0)$ (зв. вел.) блеск кометы 29P по наблюдениям в МАОС в 2021 г.

Дата	m_B	m_V	m_R	$m_B(1,1,0)$	$m_V(1,1,0)$	$m_R(1,1,0)$
1.92 ОКТ.	14.64±0.02	13.78± 0.04	13.54±0.07	6.76±0.03	5.90±0.07	5.66±0.04
2.98 ОКТ.	14.78±0.07	13.93±0.07	13.67±0.05	6.91±0.05	6.06±0.07	5.80±0.02

Видимый блеск m_a конвертировался в абсолютную яркость ядра кометы $m_a(1,1,0)$ с использованием известного эмпирического соотношения, приведенного в §4.1.1. Абсолютный блеск кометы (средние значения за две ночи) приведен в табл. 4.7. Как видно, в период мониторинга абсолютный блеск кометы имел тенденцию к снижению. Сравнивая новые данные с данными, полученными в 2017 г., а также с эфемеридной величиной общей яркости кометы 8.6^m (CNEOS, <https://ssd.jpl.nasa.gov>, 2022 г.) можно заключить, что в начале октября 2021 г. мы наблюдали более мощную по интенсивности вспышку. Аналогичные по силе вспышки отмечены в работе Trigo-Rodriguez et al. (2008).

Показатели цвета кометы по нашим наблюдениям приведены в табл.4.8. Как видно, показатель цвета (B-V) по наблюдениям в МАОС хорошо согласуется со средним колор-индексом для активных объектов группы кентавров (Jewitt 2015). Колор-индекс (V-R) против средней

величины для активных кентавров $(V-R)=0.50$ (Jewitt, 2015) указывает на сильное смещение максимума излучения в красную часть спектра, большее, чем наблюдалось в 2017 г. (Kokhirova et al. 2020), что говорит о преобладающем вкладе пылевых частиц в образовании комы. Как отмечено в §4.1.1, кома 29Р непрерывно пополняется мелкой пылью, отделяемой с поверхности ядра, систематичность этого процесса подтверждают наблюдения космического телескопа Spitzer (Trigo-Rodriguez et al. 2008, Stansberry et al. 2019). Колор-индекс $(B-R)$, среднее значение которого для активных кентавров $(B-R)=1.29$ (Jewitt 2015), указывает на наличие в коме определенного вклада газовой компоненты, причем большего, чем наблюдалось в 2017 г. (Kokhirova et al. 2020).

Таблица 4.8. Показатели цвета кометы 29Р по наблюдениям в МАОС в 2021 г.

Дата	B-V	V-R	B-R
1.92 окт.	0.86	0.24	1.10
2.98 окт.	0.85	0.26	1.11

4.1.3.2. Морфологические особенности кометы 29Р в октябре 2021 г.

Как было отмечено, комета 29Р проявляет вспышечную активность с большим количеством структур в коме (Berman, Whipple 1928a,b, Иванова и др. 2009, Ivanova et al. 2016, Ivanova et al. 2012, Trigo-Rodriguez et al. 2008). В частности, по наблюдениям в 2017 г. нами были выявлены две пылевые структуры в коме кометы (§4.1.2, Kokhirova et al. 2020). Новые наблюдения проведены в период вспышечной активности и поэтому мы поставили задачу выявить структуру комы кометы и проследить за ее изменением за временной период в 2 суток. Для этого наши изображения, полученные в фильтре R, были обработаны с помощью программы Астроарт (<http://www.msb-astroart.com/>, 2021), оснащенной рядом цифровых фильтров, в том числе фильтр Ларсона—Секанины (Larson, Sekanina 1984) и фильтр радиально-взвешенной модели

(Radial Weighted Model filter) (Bonev, Jockers 2002). Перед применением фильтрации изображения были очищены от звезд поля вокруг кометного ядра и комы. На рис.4.5 показаны первоначальное в фильтре R изображение кометы (а), и обработанные кадры с использованием цифрового фильтра Ларсона-Секанины с радиальным градиентом 8 пикселей и вращательным градиентом 30° (б) и фильтра радиально-взвешенной модели (в). Здесь на каждом кадре указаны северное (N), восточное (E) и солнечное (Sun) направления, а также обратное направление вектора скорости ($-V$).

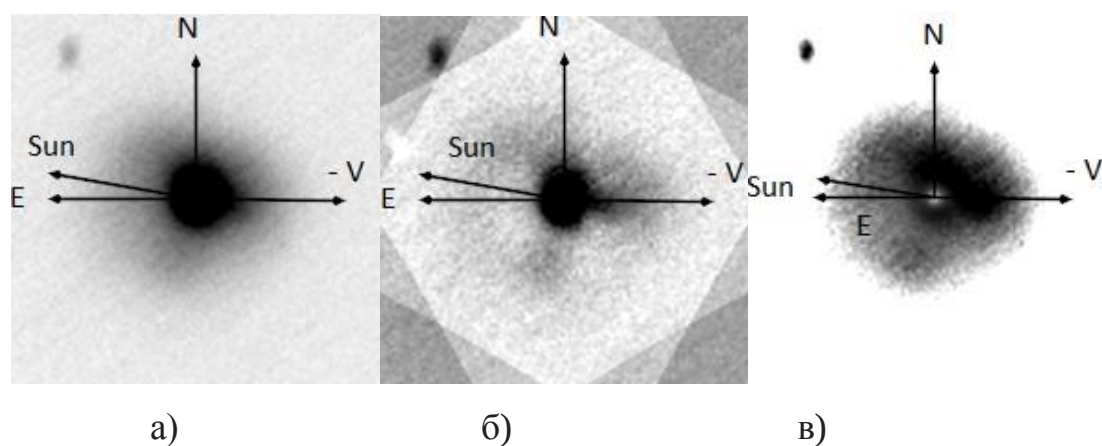


Рис.4.5. Изображение кометы 29Р, полученное 2 октября 2021 года. Кадр (а) показывает прямое изображение 29Р в R фильтре, кадры (б) и (в) представляют интенсивность изображения, к которому были применены цифровые фильтры Ларсона-Секанины и радиально-взвешенной модели.

Результаты применения данных цифровых фильтров к изображениям, полученным в BVR фильтрах в течение двух ночей наблюдений, представлены на рис. 4.6 и 4.7.

Filter	01 окт.	02 окт.
--------	---------	---------

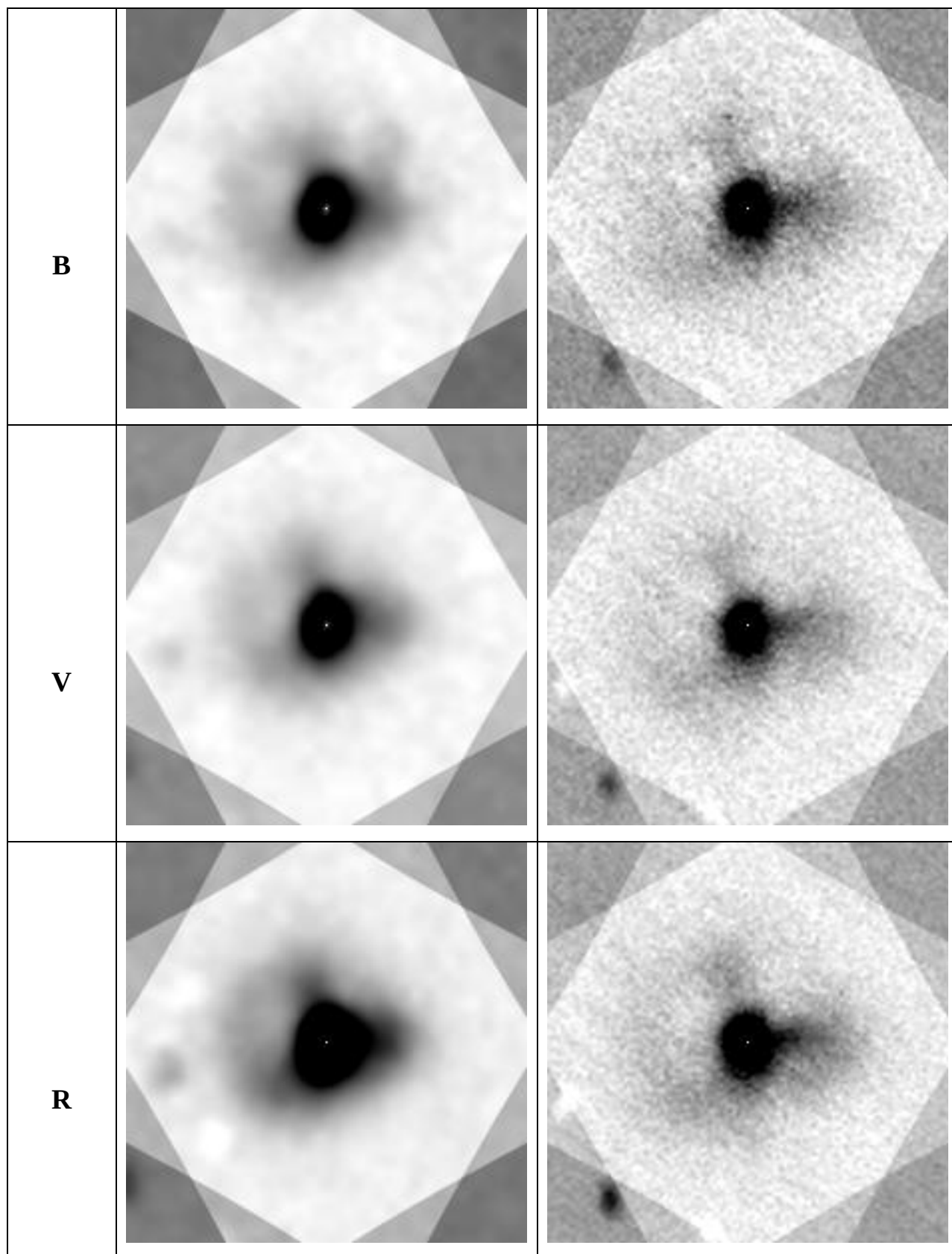


Рис.4.6. Изображения кометы 29Р (1-2 октября 2021 г., МАОС), к которым был применен цифровой фильтр Ларсона-Секанины ($\Delta R = 8$ пикселей, $\alpha = 30^\circ$).

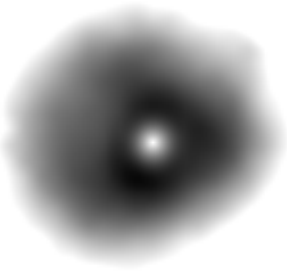
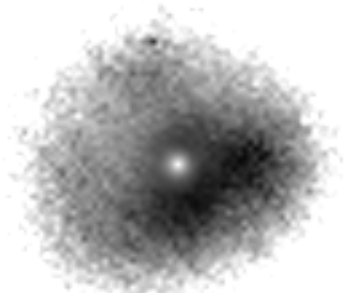
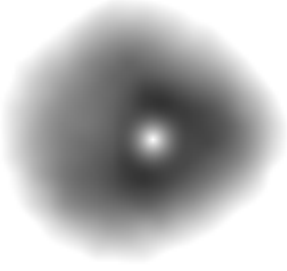
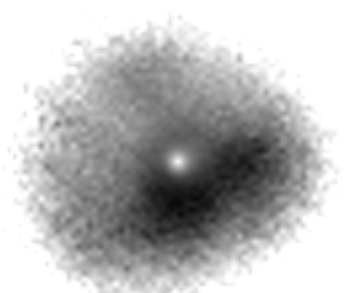
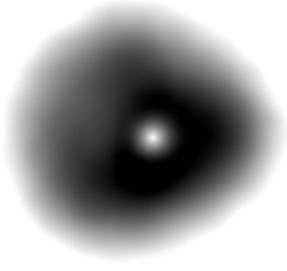
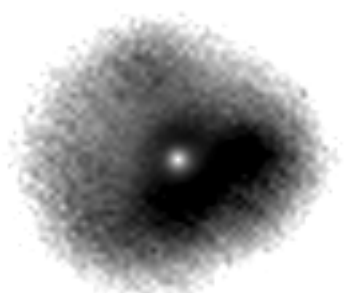
Filter	01 окт.	02 окт.
B		
V		
R		

Рис.4.7. Изображения кометы 29Р (1-2 октября 2021 г., МАОС), к которым был применен цифровой фильтр радиально-взвешенной модели.

Как видно из рис.4.6 и 4.7, кома кометы является более конденсированной в R фильтре, чем в двух других. После обработки изображений цифровыми фильтрами на фоне бесструктурной комы кометы 29P наблюдаются короткий хвост длиной около $15''$ (64 458 км), направленный от фотометрического центра кометы в сторону противоположную от Солнца, и два мощных джета. Диаметр яркой комы составляет около $16''$ (68 756 км), кома заметно вытянута в северном и южном направлении из-за наличия джетов на видимой северной и южной стороне. Активные структуры четко наблюдаются на кадрах в течение двух ночей, но изображения, полученные 2 октября, показывают снижение интенсивности, кома стала более разреженной, чем на кадрах от 1 октября (рис.4.6,4.7). Это наряду с уменьшением блеска в эти две ночи говорит о плавном снижении активности кометы. При этом нужно учитывать, что качество видимости (seeing) 1 октября составляло порядка $2.3''$ (частично из-за не совсем точной фокусировки изображения), тогда как 2 октября качество видимости составляло около $1''$.

Об обнаружении слабых или низко контрастных пылевых структур (джетов или оболочек) в коме кометы 29P по наблюдениям на гелиоцентрических расстояниях более 5 а.е. уже сообщалось в опубликованных работах (Иванова и др. 2009, Ivanova et al. 2016). В частности, по наблюдениям в 2008-2009 гг. в коме кометы обнаружены три активные структуры (Иванова и др. 2012), в 2017 г. - две пылевые структуры (§4.1.2, Kokhirova et al. 2020). Там же отмечалась и направленность таких структур в сторону Солнца и в обратном направлении. Особенности морфологии комы кометы 29P по наблюдениям в 2021 г. заключаются в наличии короткого хвоста в противоположном от Солнца направлении и двух мощных джетов в северном и южном направлении, хвост и две активные области наблюдались в течение двух ночей. Изменение ориентации

джетов в разные годы может быть вызвано как вращением ядра кометы, так и изменением положения кометы на своей орбите относительно Земли.

Снижение абсолютного блеска и более разреженная структура комы свидетельствует о плавном спаде активности после 2 октября 2021 г.

Выявленная морфология комы кометы 29P на основе новых наблюдений позволяет сделать заключение о том, что вспышечная активность осенью 2021 г. была одной из самых мощных, кроме того имеются схожести в структуре комы во время вспышек, и, следовательно, в характере проявляемой активности кометы 29P. Это может послужить в пользу подтверждения реальности механизма, ответственного за кометную активность на далеких гелиоцентрических расстояниях (Kokhirova et al. 2020).

4.1.4. О причинах вспышечной активности кометы 29P

Наблюдательные факты подтверждают, что ядра некоторых комет проявляют активность на гелиоцентрических расстояниях, намного превышающих граничное расстояние, где происходит сублимация водяного льда (менее 3 а.е.) (см., например, Sekanina et al. 1992, Rauer 1997). За исключением процесса деления ядра, для объяснения активности комет на больших гелиоцентрических расстояниях предложены различные механизмы, исходящие из гипотез о наличии внутреннего или внешнего источника. О внутренних источниках свидетельствует тот факт, что, когда комета находится на достаточно большом расстоянии от Солнца, количество получаемого ею солнечного излучения невелико. Следовательно, источник энергии вспышек комет находится в самом ядре и имеет либо химическую природу, либо летучие соединения находятся очень близко к поверхности и им достаточно получаемого тепла для сублимации. Как показали некоторые исследователи, активность комет на больших гелиоцентрических расстояниях обусловлена сублимацией наиболее летучих примесей, таких как CO, CO₂, в замороженном состоянии входящих в состав ядра (см., например, Prialnik, Bar-Nun 1992). Комбинация экзотермических процессов в кометном ядре, например,

таких, как полимеризация HCN, кристаллизация водяного аморфного льда также могут быть причиной активности комет на удаленных от Солнца расстояниях (Gronkowski, Smela 1998, Capria 2002, Prialnik 2002).

Внешним источником вспышек яркости комет является столкновение их ядер с другими небесными телами. Такие столкновения весьма вероятны, поскольку вблизи орбит комет вполне может существовать огромное количество мелких астероидов и крупных метеороидов. Однако столкновение может обусловить единовременную вспышку и не может обеспечить высокую частоту повторяемости вспышек некоторых удаленных комет. В частности, для 29P гипотеза столкновений маловероятна из-за исключительно высокой частоты повторяемости вспышек кометы.

Как уже отмечалось, комету 29P относят к классу кентавров, которые, как полагают, являются "беглецами" из пояса Койпера. Комета проявляет эпизодическую вспышечную активность на протяжении многих лет наблюдений (Richter 1941, 1954, Roemer 1958, 1962, Whipple 1980). Jewitt (1990) отмечал, что, несмотря на различную степень активности кометы на протяжении всего периода наблюдений, кома никогда полностью не исчезала. С момента открытия комета 29P стала известной своими многочисленными постоянными вспышками, т.е. внезапным резким увеличением яркости, когда блеск кометы увеличивается на 2 – 5 зв. вел. (Рябова 1997, Lamy et al. 2004). Непрерывный мониторинг кометы в течение 2002-2007 гг. позволил зарегистрировать 28 вспышек на ней (в среднем 7.3 вспышки в год), причем показано, что нет четкой периодичности в появлении вспышек, что подтверждает непредсказуемость активности этой кометы (Jewitt 2015). Обычно вспышки короткопериодических комет связаны с делением ядра, но этот процесс единовременный и не продолжительный. Примером тому служит вспышка кометы 17P/Холмса, произошедшая в г. вследствие деления ядра кометы (Williams 2010). Вспышки также могут произойти, когда кометы проходят перигелий вблизи Солнца. Однако, орбита кометы 29P расположена достаточно далеко от Солнца и температура

поверхности ее ядра, безусловно, ниже температуры сублимации водяного льда. Поэтому другие физические процессы должны приводить к проявлению вспышек кометы. По мнению Froeschle et al. (1983), вспышки яркости могут быть связаны с кристаллизацией аморфного льда на поверхности ядра. Позже эта гипотеза была сильно поддержана обнаружением выброса газа CO, вследствие его высвобождения из аморфного льда, по наблюдениям в субмиллиметровом диапазоне (Cruikshank, Brown 1983). В работе Jewitt (2015) показано, что вспышки блеска обусловлены увеличением газопроизводительной активности кометы, и в первую очередь, увеличением производства нейтрального газа CO. Однако, как показали Ivanova et al. количество газов, высвободившееся в ходе экзотермичной фазы перехода водяных льдов из аморфного в кристаллическое состояние, недостаточно для образования наблюдаемой вспышечной активности кометы. Поэтому вопрос об активности кометы 29P требует дальнейших наблюдений и исследований.

Что касается эволюции физических свойств кометы 29P, то приведем количественные данные по потере массы объекта. Имеются различные оценки количества пыли, выбрасываемого ядром кометы Швассмана–Вахмана 1 при одной вспышке яркости. В частности, Hosek et al. (2013) показали, что во время вспышки в мае 2011 г. с поверхности кометы выброшено порядка $2.6 \pm 0.3 \times 10^8$ кг пыли. Предполагая типичность вспышки и то, что в год происходит семь таких вспышек, оценка пылепроизводительности кометы во вспышечный период составила $1.8 \pm 0.2 \times 10^9$ кг пыли и эта оценка соответствует примерно 80% от общего количества пыли, производимой кометой за год (Hosek et al. 2013). Хотя эти расчеты ограничены упрощенной моделью вспышек и неопределенностями свойств ядра кометы 29P, они показывают, что на выбросы во время вспышек приходится значительная часть общего количества пыли, производимого кометой.

4.2. Комета переходной группы P/2019 LD2 (ATLAS) и результаты ее фотометрических наблюдений

Новая короткопериодическая комета была открыта 10 июня 2019 г. в рамках роботизированного астрономического обзора ATLAS, выполняемого на Гавайях в США. После обработки первых снимков новый слабый астероидоподобный объект был классифицирован как троянский астероид Юпитера (<http://www.ifa.hawaii.edu/info/press-releases/2019LD2/>, 2021). Так называют две крупные группы астероидов, которые движутся в окрестностях двух особых точек Лагранжа орбиты Юпитера в орбитальном резонансе 1:1. Считается, что миллиарды лет назад троянские астероиды сгруппировались в этих областях под действием гравитации Юпитера. Однако последующие наблюдения показали, что у объекта имеются признаки кометной активности – слабая кома и хвост. Вследствие этого, он был объявлен первым троянским астероидом Юпитера, проявившим кометную активность (<http://www.ifa.hawaii.edu/info/press-releases/2019LD2/>, 2021). Позже более детальные наблюдения, охватывающие большую дугу орбиты объекта, и тщательная обработка качественных изображений показали, что 2019 LD2 не находится в орбитальном резонансе 1:1 с Юпитером, как положено троянскому астероиду (MPEC 2020-K134: Comet P/2019 LD2 (ATLAS), 2020). Более того, эти наблюдения подтвердили, что кометная активность стала заметнее и не прекратилась со временем. Исходя из этого сделано предположение, что на самом деле этот объект является кометой семейства Юпитера с хаотической орбитой, временно «захваченной» Юпитером из популяции кентавров и периодически сближающейся с газовым гигантом, а в работе [Licandro et al. \(2020\)](#) предположено, что P/2019 LD2 является «захваченной» межзвездной кометой. Итак, первоначально 2019 LD2 ошибочно был принят за «троянца», но в последующем отождествлен как комета семейства Юпитера. В этой связи Центр малых планет MAC присвоил объекту новое обозначение P/2019 LD2 (ATLAS) в

соответствии с правилами «кометной» номенклатуры (MPEC 2020-K134: Comet P/2019 LD2 (ATLAS), 2020).

Элементы орбиты P/2019 LD2 приведены в табл.4.9 (MPEC 2020-K134: Comet P/2019 LD2 (ATLAS), 2020), где, a – большая полуось, e – эксцентриситет, q , Q – перигелийное и афелийное расстояния соответственно, i – наклонение, ω – аргумент перигелия, Ω – долгота перигелия. Комета обращается вокруг Солнца на среднем расстоянии 5.28 а.е. каждые 12.12 лет. Орбита имеет эксцентриситет 0.132 и наклонение 11.6 градуса по отношению к эклиптике, параметр Тиссерана 2.94, что типично для орбит других комет семейства Юпитера. Номинальная орбита кометы предполагает, что она не находится в стабильном резонансе 1: 1 с Юпитером, поскольку 17 февраля 2017 года она близко подошла к планете на расстояние 0.092 а.е. (13.8 млн. км) и совершит такое же близкое сближение в 2028 году (JPL Small-Body Database Browser: P/2019 LD2, 2020). Очередной перигелий своей орбиты комета прошла 10 апреля 2020 г. (P/2019 LD2, MPC IAU, 2020).

Таблица 4.9. Элементы орбиты кометы P/2019 LD2 (Атлас) (J2000.0)

Эпоха	a , а.е.	e	q , а.е.	Q , а.е.	i , град.	ω ,град.	Ω ,град.
31.05.2020	5.295	0.135	4.578	6.013	11.552	123.448	179.746

Абсолютный блеск кометы $H=12.1-12.2^m$ (P/2019 LD2, MPC IAU, 2020; JPL Small-Body Database Browser: P/2019 LD2, 2020), диаметр оценен примерно в 14 км при предполагаемом альбедо для такого класса объектов 0.12 (Fernandez et al. 2009). Период вращения и геометрическая фигура ядра нуждаются в уточнении. Орбита новой кометы находится частично внутри и за орбитой Юпитера, и ее активность напоминает активность кометы 29P/Швасмана-Вахмана 1, также принадлежащей группе кентавров. Отметим, что Sarid et al. (2019) считают объект 29P прототипными «воротами» между кентаврами и кометами семейства Юпитера. В этом

контексте изучение P/2019 LD2 способствует лучшему пониманию особенностей перехода от кентавров к кометам семейства Юпитера. Если окажется, что P/2019 LD2 является межзвездной кометой, то появляется возможность изучения этого класса объектов. Этим объясняется актуальность наблюдений и исследования новой кометы.

С целью исследования новой кометы нами проведены фотометрические наблюдения объекта в Международной астрономической обсерватории Сангloch Института астрофизики НАНТ с помощью телескопа Цейсс-1000. Регистрация объекта выполнялась с помощью ПЗС-камеры FLI Proline PL16803 (4096×4096 пикселей, размер пикселя 9 микрон). Шум считывания камеры – 10 e^- (электронов), рассчитанный коэффициент преобразования (усиление) – около $0.497\text{ e}^-/\text{ADU}$ (аналого-цифровые единицы). Камера была установлена в касегреновском фокусе телескопа (13 300 мм) и оснащена стандартными широкополосными фотометрическими фильтрами системы Джонсона-Козинса, позволяющим выделить соответствующий диапазон спектра при наблюдениях. Для увеличения показателя сигнал/шум (S/N) изображений использовалось бинирование 4×4 . В результате был получен масштаб снимков $0.579''/\text{пиксель}$ при поле порядка $10'\times 10'$. Для уменьшения уровня шумов ПЗС камеры аппаратуру охлаждают до температуры -20°C .

Первичная обработка (учет темновых токов, байеса и плоских полей) и сложение снимков проведено с использованием программного обеспечения Astroart 4.0 (<http://www.msb-astroart.com/>, 2021). Для апертурной фотометрии кометы и опорных звезд использовалась утилита ATV под IDL для Windows (Barth 2001).

Для отождествления опорных звезд использовался каталог APASS (DR9) (Henden et al., 2016). Каталог включает в себя звезды примерно до 17-й звездной величины в фильтрах B , V , а также специальных кометных фильтрах системы Слоан g' , r' , i' . Блеск каталожных звезд определен с точностью 0.07^{m} для полосы B , 0.05^{m} для V и менее 0.03^{m} для r' (Henden et al.

2016). Для перехода от r' к R звездным величинам использовалась формула из Munari et al. (2014). Фотометрические стандарты 13 – 17 зв. величины в количестве 5 – 7 звезд отбирались для каждой ночи наблюдений при помощи онлайн сервиса Aladin (<http://www.aladin.u-strasbg.fr>, 2021).

4.2.1. Определение физических свойств кометы P/2019 LD2 (ATLAS): блеск, диаметр

Сводка наблюдений в течение 5 ночей в августе 2020 г. и результаты их фотометрической обработки приведены в табл.4.10. Здесь указаны положение орбиты кометы во время мониторинга: r и Δ расстояния кометы от Солнца и Земли, ph - фазовый угол, данные взяты из базы данных MPC (<https://www.minorplanetcenter.net>, 2020), детали выполненных экспозиций: N_R и t – количество и время экспозиций в фильтре R , усредненные значения видимых m_R звездных величин на момент экспозиции и абсолютная $m_R(1,1,0)$ звездная величина объекта, полученные в фильтре R , а также оценки параметра пылепроизводительности $Af\rho$ и радиуса r_N ядра кометы по нашим измерениям. Измерения изображений выполнены апертурой радиусом $\rho=4.05''$, проекция которого на картинную плоскость объекта соответствует 10588 км, последняя величина рассчитана по соотношению $\rho=\Delta \cdot \text{tg}(\rho)$. Радиус апертуры для измерения яркости кометы был определен при помощи кривых роста с помощью Astroart и соответствует максимуму отношения сигнала к шуму (S/N). Изображение кометы во время наблюдений приведено на рис.4.8.

Таблица 4.10. Журнал наблюдений кометы P/2019 LD2 (Атлас) в 2020 г. и результаты фотометрических измерений

Дата, UT	r , а.е.	Δ , а.е.	ph , гра д.	$N_R \times t$, сек.	m_R , зв.вел.	$Af\rho$, см	ρ''	$m_R(1,1,0)$, зв.вел.	r_N , км
06 августа 17:03:33	4.59 1	3.590	2.3	28 x 120	17.53 ± 0.03	272 ± 7.5			

07 августа 17:31:26	4.591	3.590	2.3	41 x 120	17.54 ± 0.04	269 ± 9.9	4.05	11.41 ± 0.03	7.4 ± 0.14
08 августа 16:59:45	4.592	3.590	2.2	23 x 120	17.71 ± 0.04	230 ± 8.5			
14 августа 21:43:15	4.593	3.597	2.6	24 x 120	17.58 ± 0.02	260 ± 4.8			
15 августа 20:36:11	4.593	3.599	2.7	53 x 120	17.62 ± 0.01	251 ± 2.3			

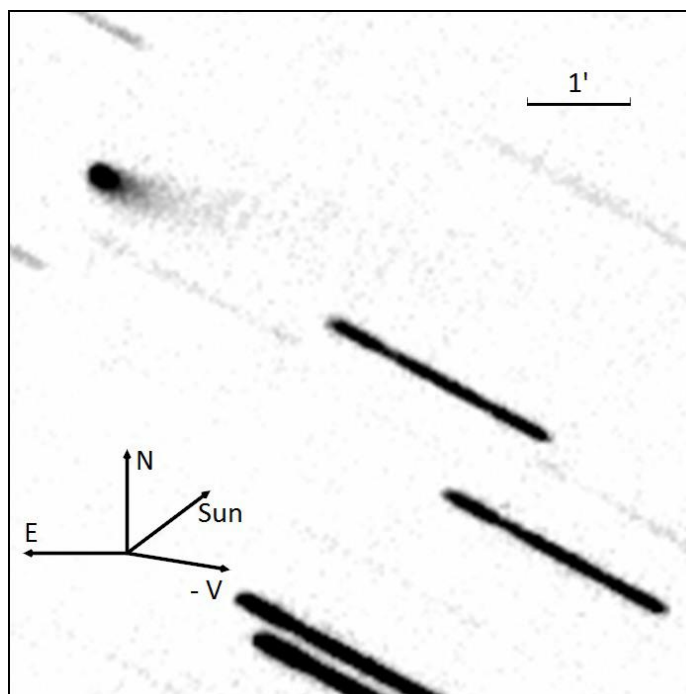


Рис.4.8. Суммарное изображение кометы P/2019 LD2 в фильтре R, 15 августа 2020 г., телескоп Цейсс-1000 МАОС.

Как видно из табл.4.10, в период мониторинга видимый блеск кометы не подвергался значительным изменениям. Видимый блеск m_R конвертировался в абсолютную яркость ядра кометы $m_R(1,1,0)$ с использованием следующего эмпирического уравнения (Snodgrass et al. 2014):

$$m_R(1,1,0) = m_R - 5\log(r\Delta) - \beta\alpha, \quad (4.1)$$

здесь $m_R(1,1,0)$ – блеск гипотетической точки на единичном гелиоцентрическом и геоцентрическом расстояниях с фазовым углом $ph=0$ град., m_R – измеренный блеск, r и Δ – гелио- и геоцентрические расстояния кометы в а.е., α – фазовый угол (ph) в градусах, β – фазовый коэффициент в звездных величинах на градус. Для фазового коэффициента использовано общепринятое значение $\beta=0.04$ зв.вел./град. (Lamy et al. 2004). Абсолютный блеск кометы по нашим измерениям составил 11.41^m (табл.4.10), его отличие от эфемеридной величины $12.1-12.2^m$ указывает на нормальную кометную активность объекта в этот период.

Изофоты кометы, построенные при помощи SAO Image DS9 (<https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimageds9>, 2021), представлены на рис.3.6 и наглядно демонстрируют распределение яркости вдоль хвоста кометы.

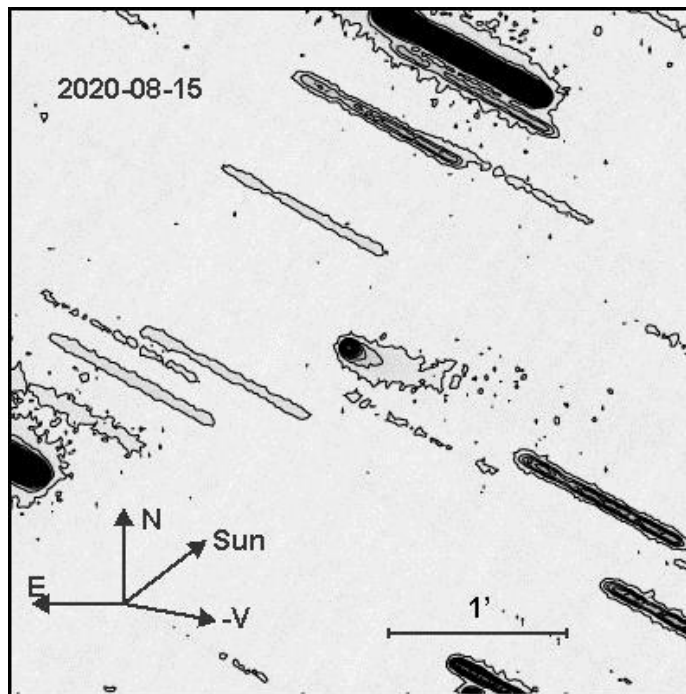


Рис.4.9. Изображение хвоста кометы, полученное 15 августа 2020 г. Изофоты использовались для улучшения видимости хвоста.

Верхний предел радиуса кометного ядра на момент минимальной активности за период наблюдений, который, судя по величине параметра пылепроизводительности, пришелся на 8 августа 2020 г., оценивался с использованием следующего эмпирического соотношения между измеренным в фильтре R абсолютным блеском $m_R(1,1,0)$ кометы и эффективным радиусом ядра кометы r_N в метрах (см., например, Solontoi et al. 2012)

$$A_R r_N^2 = 2.238 \cdot 10^{22} 10^{0.4(m - m_R(1,1,0))}, \quad (4.2)$$

где A_R – геометрическое альbedo и $m_\odot = -27.29$ зв.вел. - видимый блеск Солнца (Cox 2000), причем обе величины в фильтре R . Оценка верхнего предела радиуса ядра, полученная с использованием величины альbedo для кометной пыли $A_R=0.12$ (Fernandez et al. 2009), составляет 7.4 км (табл.4.10) и хорошо согласуется с величиной диаметра ядра 14 км, приведенного в различных базах данных.

4.2.2. Пылепроизводительность кометы P/2019 LD2 (ATLAS).

Уровень активности кометы можно оценить количественно, используя параметр $Af\rho$, который теоретически независим от времени и места наблюдений (A'Hearn et al. 1984). Параметр $Af\rho$ может быть определен с помощью звездной величины по следующему выражению (A'Hearn et al. 1984):

$$Af\rho = \frac{4r^2 \Delta^2 10^{0.4(m_\odot - m_a)}}{\rho}, \quad (4.3)$$

где A – альbedo, f – коэффициент заполнения апертуры поля зрения, соответствующий кометной пыли, ρ – проекция радиуса фотометрической апертуры на картинную плоскость в см, $m_\odot$ и m_a – видимые звездные величины Солнца и кометы, соответственно, в определенном фильтре, r – гелиоцентрическое расстояние объекта в а.е. и Δ – геоцентрическое расстояние в см. Для наблюдений, полученных на телескопе Цейсс-1000, параметр $Af\rho$ вычислен с использованием изображений, полученных в фильтре R , и тем же

радиусом проекции апертуры $\rho=10588$ км ($4.05''$). Полученные значения вместе с ошибками приведены в табл.4.10. Величины параметра пылепродуктивности наряду с величиной абсолютного блеска также подтверждают повышенную активность кометы, кроме того, в период наблюдений гелиоцентрическое расстояние постепенно увеличивалось, в этой связи наблюдается тенденция уменьшения параметра.

На рис.4.10 показано распределение параметра $Af\rho$ в зависимости от радиуса апертуры измерений, найденное по нашим наблюдениям.

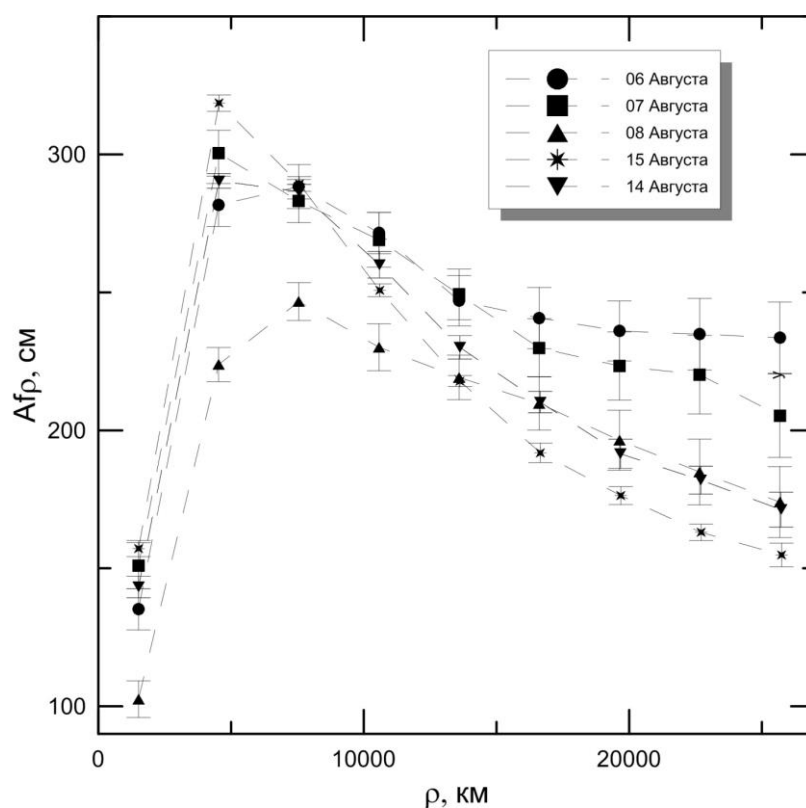


Рис.4.10. Распределение параметра $Af\rho$ в зависимости от радиуса фотометрической апертуры.

4.2.3. Структура пылевого хвоста кометы P/2019 LD2 (ATLAS).

Движение пылевых частиц в коме – сложный процесс, точное описание траекторий частиц в кометной атмосфере требует усовершенствованных гидродинамических моделей, учитывающих взаимодействие между газом и пылью, высвобождаемой с поверхности. В кометном хвосте пыль и газ –

разделены, и единственными значимыми силами, влияющими на траекторию частиц, является солнечная гравитация и давление излучения. Обе силы зависят от квадрата гелиоцентрического расстояния, но действуют в противоположных направлениях. Уравнение движение в таком случае можно представить в виде:

$$m \times a = (1 - \beta) \times g_{Sun}, \quad (4.4)$$

где m и a – масса и ускорение пылевой частицы соответственно, β – это соотношение радиационного давления и солнечной гравитации ($\beta = P_{\text{radiation}}/g_{\text{Sun}}$), которое обратно пропорционально размеру для частиц размером более 1 микрона (Finson, Probsteyn 1968). Исходя из этого соотношения, Финсон и Пробстейн (1968) предложили модель, которая описывает полную геометрию хвоста с сеткой синхрон и синдинам – линий, представляющих соответственно местоположения частиц, выброшенных с поверхности ядра в одно и то же время или с одинаковым β коэффициентом. Модель Финсона – Пробстейна упрощенная, поскольку она рассматривает только частицы, выброшенные в плоскости орбиты кометы, и с нулевой начальной скоростью, но она обеспечивает очень хорошее приближение формы хвоста и успешно использовалась для изучения хвостов, как комет, так и некоторых активных астероидов (Borysenko et al. 2020a,b).

Нами построена диаграмма Финсон-Пробстейна кометы с использованием интернет-сервиса (<http://www.comet-toolbox.com/FP.html>, 2021) и элементов орбиты кометы по данным MPC (MPEC 2020-UR0, 2021) (рис.4.11а,б). На диаграмме по осям абсцисс и ординат отложены координаты кометы - прямое восхождение α и склонение δ , соответственно. На рис.4.11а показано распределение синхрон и синдинам во внутренней коме (размер области примерно $13'' \times 13''$). Их распределение по всей видимой части комы показано на рис.4.11б (размер области примерно $108'' \times 108''$). Учитывая, что $\beta = 0.57 Q_{pr} / \delta a$, где δ - плотность пылинки, выраженная в г/см^3 , a - радиус пылинки в мкм, Q_{pr} - эффективность радиационного давления, которая зависит от размера, формы и оптических характеристик пылинки (для

кометной пыли эффективность радиационного давления обычно порядка единицы), то, приняв плотность кометной пыли порядка 0.1 г/см^3 (Greenberg, Li 1999), можно сказать, что во внутренних областях комы доминируют крупные частицы размером $> 100 \text{ мкм}$.

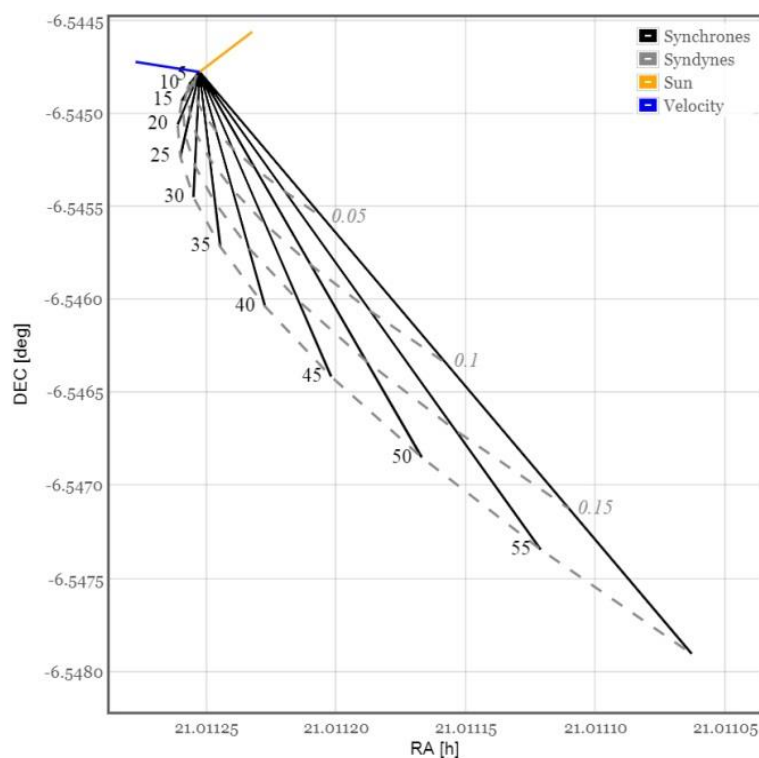


Рис.4.11а. Диаграмма Финсон-Пробстейна для кометы P/2019 LD2 (ATLAS) (внутренняя кома), 15 августа 2020 г. Синдинамы (пунктирные линии) показывают распределение значения параметра β для частиц кометной пыли ($\beta=0.05$; 0.1 ; 0.15), который обратно пропорционален их размеру; синхроны (сплошные линии) показывают геометрическое место пылинок различного размера, которые высвободились из ядра определенное количество времени назад ($d=5-60$ дней) от времени наблюдения. Направления к Солнцу и вектора скорости также указаны на диаграмме.

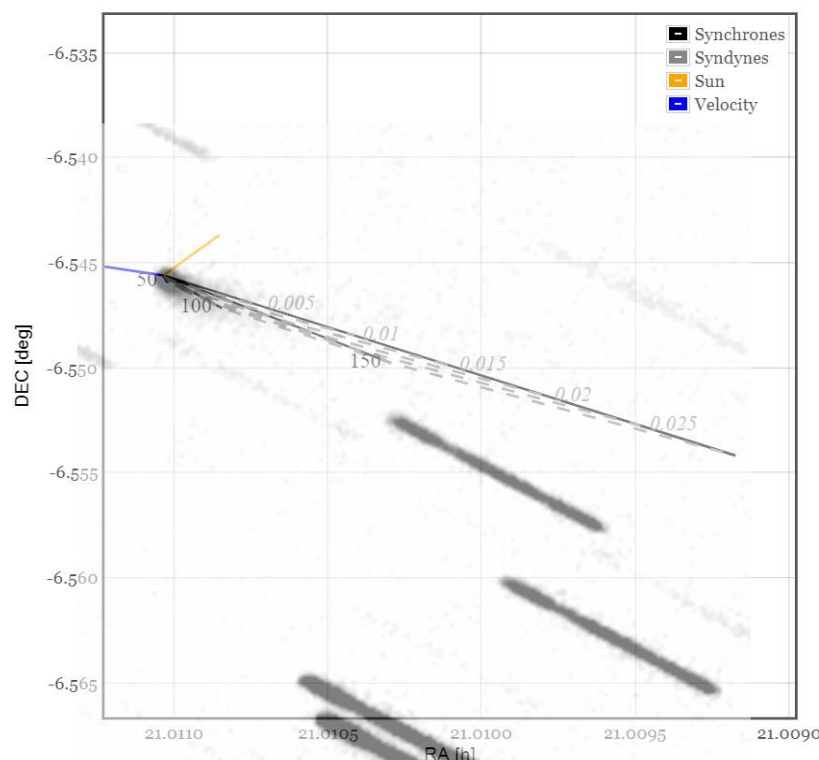


Рис.4.11б. Диаграмма Финсон – Пробстейна для изображения кометы P/2019 LD2, наложенного на координатную сетку в реальном масштабе по состоянию на 15 августа 2020 г., здесь показано распределение синдинам и синхрон по всей видимой части комы.

Наличие короткого хвоста в направлении против движения кометы указывает на наличие крупнозернистой пыли в кометной атмосфере. На кометную пыль солнечный ветер почти не действует, её выталкивает из комы давление солнечного света. Поэтому формирование хвоста определяется начальной орбитальной скоростью движения и ускорением под действием давления света.

4.2.4. О происхождении кометы P/2019 LD2 (ATLAS)

Новые фотометрические данные указывают, что в период мониторинга комета находилась в состоянии несколько повышенной кометной активности, связанной, главным образом, с недавним прохождением перигелия. Во время наблюдений гелиоцентрическое расстояние кометы составляло 4.591-4.593 а.е., на таких расстояниях, меньших 5 а.е. или т.н. «снеговой линии» (Jewitt et al. 2007), все еще могут проявляться типичные механизмы, ответственные за нормальную кометную активность, а именно,

солнечный нагрев поверхности, сублимация поверхностных замороженных летучих компонентов, выброс пыли и образование комы и хвоста. Эти данные подтверждают вывод Sarid et al. (2019), показавших, что область расположения транзитных объектов (от Кентавров к кометам семейства Юпитера), к которым наряду с кометой 29P относится и P/2019 LD2 (ATLAS), совпадает с гелиоцентрическим диапазоном расстояний, где активность наблюдаемых кометных тел значительно возрастает.

Настоящая орбита кометы показывает, что комета находится в стадии перехода от Кентавров к кометам семейства Юпитера. Несколько повышенное значение A_{fp} по сравнению с другими кометами семейства Юпитера (Borysenko et al. 2019, 2020a) может указывать на предыдущее длительное пребывание кометы во внешних областях Солнечной системы.

Выводы по главе IV.

Приведены результаты астрометрических и фотометрических наблюдений кометы 29P в обсерватории Санглов в 2017 г. Определены экваториальные координаты, геоцентрическая траектория и орбита кометы. Измерены видимые звездные величины кометы в фильтрах BVRI и построены кривые блеска. Определена абсолютная яркость кометы в фильтрах BVRI. Кривые блеска не выявили заметных колебаний абсолютной яркости в пределах погрешности измерений за период наблюдений. Среднее значение абсолютного блеска кометы в фильтрах V и R составляло $9.60^m \pm 0.04$ и $9.10^m \pm 0.04$, соответственно. Показатели цвета хорошо согласуются со средними значениями для активных объектов группы кентавров. Кроме того, они указывают на доминирующий вклад пылевой компоненты в кому, которая имеет более красную отражательную способность. Оценки диаметра ядра по нашим наблюдениям соответствуют имеющимся опубликованным оценкам. Для наших данных, полученных с помощью фильтров R и I, мы использовали метод выделения слабоконтрастных структур в кометной коме. Показано, что кометная кома более уплотнена в фильтре R, чем в фильтре I;

выявлены две пылевые структуры у кометы в направлении к Солнцу и от Солнца.

По наблюдениям кометы 29P в октябре 2021 г. в обсерватории Сангloch определены видимый и абсолютный блеск кометы в фильтрах *BVR*. Показатель цвета (*B-V*) соответствует значению для активных объектов группы кентавров, величина (*V-R*) показывает, что в коме кометы усилен вклад пылевой компоненты, показатель (*B-R*) указывает на определенный вклад газового компонента. В структуре комы кометы выявлены короткий хвост в антисолнечном направлении и два мощных джета в северном и южном направлениях, хвост и две активные области наблюдались в течение двух ночей. Снижение абсолютного блеска и более разреженная структура комы свидетельствует о плавном спаде активности после 2 октября 2021 г.

Выявленная морфология комы кометы 29P на основе новых наблюдений позволяет сделать заключение о том, что вспышечная активность осенью 2021 г. была одной из самых мощных, кроме того имеются схожести в структуре комы во время вспышек, и, следовательно, в характере проявляемой активности кометы 29P. Это может послужить в пользу подтверждения реальности механизма, ответственного за кометную активность на далеких гелиоцентрических расстояниях.

По данным фотометрических наблюдений кометы P/2019 LD2 (ATLAS), проведенных в августе 2020 г. с помощью телескопа Цейсс-1000 обсерватории Сангloch с использованием широкополосного фильтра *R* получены физические характеристики кометы:

- 1) видимые звездные величины m_R по измерениям каждой ночи наблюдений;
- 2) абсолютная звездная величина $m_R(1,1,0) = 11.42^m$;
- 3) параметр пылепроизводительности $Af\rho$ порядка 250 см (при $\rho = 4.05''$);
- 4) оценка верхнего предела радиуса ядра кометы $r_{max} = 7.4$ км при альбедо $A = 0.12$;

5) построены изофоты кометы, демонстрирующие распределение яркости вдоль хвоста;

6) построены Финсон-Пробстейн диаграммы внутренней и всей видимой части пылевого хвоста кометы и выявлена его структура, а именно распределение пылевых частиц по размерам и по времени выброса с поверхности ядра. Показано, что во внутренних областях пылевого хвоста доминируют крупные частицы размером свыше 100 мкм и по мере удаления от ядра размеры частиц хвоста уменьшаются.

Новые фотометрические данные указывают, что в период мониторинга комета находилась в состоянии нормальной кометной активности, связанной главным образом, с недавним прохождением перигелия. Анализ орбиты кометы показал, что она действительно находится в стадии перехода из группы кентавров в кометы семейства Юпитера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации достигнуты все поставленные цели исследований и выполнен весь объём работ, запланированных для достижения этих целей.

С целью изучения активных объектов в работе использован наблюдательный материал, полученный в обсерватории Санглов Института астрофизики НАНТ и Крымской астрофизической обсерватории РАН. Основные результаты, полученные в диссертации, можно сформулировать в виде следующих выводов:

Исследованы динамические и физические характеристики избранных активных объектов Солнечной системы на основе оптических многоцветных наблюдений с использованием телескопа Цейсс-1000 в астрономической обсерватории Санглов Института астрофизики НАНТ, телескопа АЗТ-11 Крымской астрофизической обсерватории РАН и телескопа АЗТ-8 станции Лесники астрономической обсерватории КНУ им.Т.Г.Шевченко. Для астрометрической и фотометрической обработки наблюдений использовались ПП Апекс II, Astrometrica, IDL, пакет IDL Sky, AperturTool и

MaximDL 5, для анализа и интерпретации данных использованы современные ПП SAO Image DS9, Finson & Probst diagram, rotational gradient method of Larson & Sekanina и др. Анализ результатов, полученных на основе их использования, и их сравнение с имеющимися данными показали приемлемую точность определения координат и звездных величин объектов, необходимые для вычисления орбит и нахождения физических параметров.

Представлены результаты многоцветных наблюдений активного астероида (596) Шейла в 2011 и 2017 гг. Определены координаты объекта и орбита, получены видимый и абсолютный блеск, показатели цвета, оценка диаметра и периода вращения астероида. Анализ полученных данных показал, что астероид продолжает сохранять абсолютное значение блеска и другие характеристики, несмотря на столкновение с малым телом в декабре 2010 г., приведшем к вспышке и появлению кометной активности астероида. Столкновение астероида (596) Шейла с малым телом не привело к катастрофическому изменению поверхности астероида или к его полному распаду. После вспышки в 2010 г. у астероида (596) Шейла вспышечная активность больше не проявлялась.

В результате многоцветных наблюдений астероида (3552) Дон Кихот в 2018 г. зарегистрирована его вспышечная активность, характерная для комет. Определены координаты и орбита, видимый и абсолютный блеск, показатели цвета, диаметр. Кометоподобная орбита, низкое значение альбедо, показатель цвета и зарегистрированная активность указывают на то, что астероид с очень высокой вероятностью является ядром угасшей кометы. Завершение вспышки зарегистрировано на 10 сутки после ее начала. На основе характера активности, стабильности орбиты и физических параметров сделано предположение, что выброс пыли и, как следствие, вспышка яркости, явились результатом столкновения астероида 3552 с другим небольшим объектом или бомбардировки его поверхности мелкими метеороидами.

В период наблюдений двойственного объекта 2008 GO98 (362P) на Санглохе и в Лесниках в 2017 г. у него зарегистрированы признаки кометной активности в виде пылевой комы и хвоста, наличие которых подтвердили результаты исследования морфологии изображений. Определены видимые и абсолютные звездные величины объекта, и показано постепенное их снижение в период наблюдений, что свидетельствует об убывании активности к концу мониторинга. Оценка эффективного диаметра астероида по нашим наблюдениям ~ 7 км согласуется с имеющимися данными. Параметр пылепроизводительности указывает на активную стадию объекта. Полученные новые данные позволяют предположить кометную природу объекта, ныне находящегося в угасшей стадии. Определены экваториальные координаты астероида и вычислена орбита, элементы которой согласуются с имеющимися орбитальными данными. Активность объекта не повлияла на стабильность орбиты.

По наблюдениям в 2017 и 2021 г. во время вспышечной активности исследована комета 29P, принадлежащая группе кентавров. Определены динамические и физические свойства, изучена морфология изображений и выявлены пылевые структуры в коме кометы в виде хвоста и джетов. Новые данные подтверждают принадлежность кометы к активным объектам группы кентавров и, следовательно, к объектам пояса Койпера. Можно заключить, что наши наблюдения подтвердили вспышечную активность кометы 29P, отсутствие четкой периодичности в появлении вспышек, а также схожесть характера вспышек и структуры комы. В отсутствии процесса деления ядра кометы, о чем свидетельствует сохраняющаяся величина его размера, наиболее вероятный механизм вспышек связан с кристаллизацией аморфного льда на поверхности ядра и высвобождением нейтрального газа CO.

В результате оптических наблюдений короткопериодической кометы P/2019 LD2 (Атлас) в 2020 г. определены абсолютный блеск, параметр пылепроизводительности и верхний предел радиуса ядра. Выявлено распределение яркости вдоль хвоста и структура пылевого хвоста. Показано,

что вблизи поверхности ядра кометы находятся самые крупные пылевые частицы размером более 100 мкм и по мере удаления от ядра размеры частиц хвоста уменьшаются. Фотометрические данные указывают, что в период мониторинга комета находилась в состоянии нормальной кометной активности, связанной главным образом, с недавним прохождением перигелия. Анализ орбиты кометы показал, что она действительно находится в стадии перехода из группы кентавров в кометы семейства Юпитера.

В качестве перспектив данной работы будет продолжено накопление наблюдательного материала, усилен поиск новых активных астероидов и объектов с двойным статусом. Также планируется выполнить астрометрические и фотометрические наблюдения для более детальной интерпретации точных данных об активных объектах с целью определения их природы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает огромную благодарность своему научному руководителю, Кохировой Гулчехре Исроиловне, за ее безграничную помощь в подготовке диссертации, а также всем коллегам за совместные работы, внимание и поддержку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабаджанов П.Б., Кохирова Г.И. Метеорные потоки астероидов, пересекающих орбиту Земли. - Душанбе: Изд-во АН РТ «Дониш», 2009. — 185 с.
2. Бредихин Ф.А. Этюды о метеорах Серия “Классики науки”. - М.: Изд-во АН СССР, 1954. - 607 с.
3. Бусарев В. В., Барабанов С. И., Пузин В. Б. Оценка состава вещества и обнаружение сублимационной активности астероидов 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины и 1474 Бейры//Астрономический вестник. – 2016. – Т. 50. – №. 4. – С. 300-312.
4. Бусарев В. В., Щербина М. П., Кохирова Г. И. и др. Подтверждение сублимационной активности астероида 704 Интерамния//ДАН Республики Таджикистан. — 2018. — Т. 61, № 1. — С. 27–37.
5. Бусарев В.В., Щербина М.П., С.И. Барабанов и др. Подтверждение сублимационной активности примитивных астероидов Главного пояса 779 Нины, 704 Интерамнии и 145 Адеоны и ее вероятные спектральные признаки у 51 Немаузы и 65 Цибелы//Астрономический вестник – 2019 – Т.53, №4, – С. 273- 290.
6. Девяткин А.В. Комплексный анализ наблюдений тел Солнечной системы методами астрометрии и фотометрии//Автореферат диссертации на соискание ученой степени д. ф.-м. н. – 2011. – 40 с.
7. Девяткин А.В. и др. Программные пакеты «АПЕКС-I» и «АПЕКС-II» для обработки астрономических ПЗС-наблюдений//Астрономический вестник. –2010. - № 1. –С.74–87.
8. Дейч А.Н. Фотографическая астрометрия//Курс астрофизики и звездной астрономии//под.ред.акад. А.А. Михайлов. – М.: Наука. – 1973. – Том. 1. – С. 178–271.
9. Дубошин Г.Н. Справочное руководство по небесной механике и астеродинамике. – М.: Наука. – 1976. – 864 с.

10. Иванова А.В. и др. Определение периода вращения кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 по пылевым структурам (джетам) в коме//Астрон. вестн. – 2012. – Т. 46, №. 4. – С. 333-339.
11. Иванова А.В., Корсун П.П., Афанасьев В.Л. Фотометрические исследования удаленных комет C/2002 VQ94 (LINEAR) и 29P/Швассмана-Вахмана 1//Астрономический вестник. – 2009. Т. 43. – №5. – С. 470 – 480.
12. Киселёв А.А. Теоретическая основания фотографической астрометрии. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1989. – 264 с.
13. Киселев Н.Н., Рахматуллаева Ф.Д., Антонюк А.К., Пить Н. Относительная фотометрия астероида Шейла//ДАН Республики Таджикистан. — 2014. — Т. 57, № 11-12. — С. 823–828.
14. Кохирова Г.И., Иванова А.В., Рахматуллаева Ф.Дж. и др. Результаты комплексных наблюдений астероида (596) Шейла в Международной астрономической обсерватории Санглох//Астрономический вестник – 2018 – Т.52, №6, – С. 511- 520.
15. Кохирова Г.И., Рахматуллаева Ф.Дж., Борисенко С.А. Результаты фотометрических наблюдений кометы P/2019 LD2 в обсерватории Санглох//Астрономический вестник. – 2021. – Т. 55, №. 5. – С. 408-415.
16. Лупишко Д.Ф., Бельская И.Н., Киселев Н.Н. Малые тела Солнечной системы//200 лет Астрономии Харьковском Университете (под редакцией проф. Ю. Г. Шкуратова). – 2008. - С.103-124.
17. Лупишко Д.Ф., Круглый Ю.Н., Шевченко В. Г. Фотометрия астероидов// Кинем. Физ. неб. тел. —2007. —Том. 23. —С. 235-244.
18. Львов В.Н., Цекмейстер С.Д. Использование программного пакета ЭПОС для исследования объектов Солнечной системы//Астрономический вестник. – 2012. – Т. 46. – № 2. – С. 190 – 192.
19. Майгурова Н.В. Уточнение связи оптической и радиосистем координат по ПЗС-наблюдениям избранных внегалактических радиоисточников в

- оптическом диапазоне. – Дис. канд. физ.-мат. наук. – Киев. – Машинопись. – 2006. – 142 с.
20. Малкин И.Г. Некоторые задачи теории нелинейных колебаний. М.: Гостехиздат. – 1956. – 371 с.
 21. Медведев Ю.Д. Определение орбит астероидов, сближающихся с землей, по наблюдениям первой оппозиции//Астрономический вестник. – 2011. – Т. 45. - № 5. – С. 396–401.
 22. Понтрягин Л.С. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Физ- матгиз. – 1961. – 300 с.
 23. Рябова Г.О. Моделирование метеороидных потоков: Скорости выброса метеороидов из комет//Астрономический вестник. — 2013. — Том 47, № 3. — С. 236–256.
 24. A’Hearn M.F. Comet Bowell 1980b// The Astron. Journal. — 1984. —Vol. 89. P. 579-591.
 25. Agarwal J., Jewitt, D., Weaver H. Dynamics of Large Fragments in the Tail of Active Asteroid P/2010 A2//Astrophysical Journal. – 2013.–Vol.769. – № 1. – P. 46.
 26. Aladin Sky Atlas, 2021—режим доступа: <http://www.aladin.u-strasbg.fr>.
 27. APASS: The AAVSO Photometric All-Sky Survey [Электронный каталог] – Режим доступа: <https://www.aavso.org/apass>.
 28. Astroart software 4.0. – Режим доступа: (<http://www.msb-astroart.com>, дата обращения: 2020-2021).
 29. Astronomical Catalogs and Catalog Formats//Smithsonian Astrophysical observatory. – 2022. – Режим доступа: <http://tdc-www.harvard.edu/catalogs/index.html> (дата обращения, 2017-2022).
 30. Bailey B., Malhotra R. Two dynamical classes of Centaurs //Icarus. – 2009. – Vol. 203, №. 1. – P. 155-163.
 31. Barth A. ATV: An image-display tool for IDL//ASP Conf. Ser., Astron. Data Analysis Software and Systems X/Eds Harnden F.R., Jr, Primini F.A., Payne H.E. San Francisco: ASP. — 2001. — Vol.238. — P. 385.

32. Barth A. ATV: An image-display tool for IDL//In: ASP Conf. Ser., Astronomical Data Analysis Software and Systems X. — 2001. — Vol.238, San Francisco: — ASP. P. 385.
33. Barucci A.M., Doressoundiram A., Cruikshank D.P. Surface characteristics of transneptunian objects and Centaurs from photometry and spectroscopy// Comets II. —2004. — P.— 647-658.
34. Bauer J.M.et al. WISE/NEOWISE Observations of Active Bodies in the Main Belt//Astrophysical Journal. — 2012. — Vol.747, №1. — Id: 49 9 pp.
35. Belskaya I.N., Shevchenko V.G. Opposition Effect of Asteroids// Icarus. — 2000. —Vol.147. — P. 94-105.
36. Berman L., Whipple F.L. Notes on Comet J 1927//Public of the Astron. Soc. of the Pacific. - 1928a. — Vol. 40. — P. 34.
37. Betzler A.S.et al. Photometric Observations of 596 Scheila, 1990 BG, 1990 TG1, 1999 CU3, 2000 DM8, 2001 PT9, 2001 SN263, 2002 NP1, 2002 JP9, 2003 UV11, 2006 AL8, 2008 SR1, 2009 BH81, 2009 QC, P/2010 A2 (LINEAR), 2010 JK33, 2010 LY63, 2010 RF12, 2010 UD, P/2010 R2 (La Sagra), 2010 YS, 2011 AN16, and 2011 EZ78//Bulletin of the Minor Planets Section of the Association of Lunar and Planetary Observers. —2012. — Vol. 39, №1. — P.5-8.
38. Bodewits D.et al. Collisional Excavation of Asteroid (596) Scheila//The Astrophysical Journal Letters. — 2011. — Vol. 733. — L3.
39. Bonev T., Jockers K. Spatial distribution of the dust color in comet C/LINEAR (2000 WM1)//ACM. — 2002. —P. 587–591.
40. Borovicka J. About the definition of meteoroid, asteroid, and related terms//2016 WGN, The Journal of the IMO. — 2016. — 44:2. — P. 31-34.
41. Borovička J. et al. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor//Nature. — 2013. — Vol. 503. — P. 235–237.
42. Borysenko S., Baransky A., Mussiuchuk E. Photometric observation of ecliptic comet 47P/Ashbrook-Jackson and selected quasi-Hilda and main

- belt comets at Kyiv Comet Station (MPC code -585) in 2017//*Icarus*. – 2019. – Vol.317. – P.44–47.
43. Borysenko S.A.et al. Broadband photometry of asteroid 6478 (Gault): Activity and morphology//*Astronomische Nachrichten*. —2020. —Vol.341, Issue 4. — P. 395-401.
 44. Borysenko S.et al. Study of the physical properties of selected active objects in the main belt and surrounding regions by broadband photometry//*Astronomische Nachrichten*. —2020a. —Vol. 341, Issue 9. — P. 849-859.
 45. Bottke W.F.et al. Debiased Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects//*Icarus*. — 2002. —Vol.156. —№2. P. — 399-433.
 46. Bowell E. et al. Application of photometric models to asteroids//*Asteroids II*. – 1989. – P. 524-556.
 47. Bowell E.et al. Application of photometric models to asteroids//*Asteroids II*. — 1989. —P. 524-556.
 48. Busarev V. V. et al. New candidates for active asteroids: Main-belt (145) Adeona, (704) Interamnia, (779) Nina, (1474) Beira, and near-Earth (162,173) Ryugu // *Icarus*. – 2018. – Vol. 304. – P. 83-94.
 49. Busarev V. V., Barabanov S. I., Puzin V. B. Spectral signs of cometary activity on primitive asteroids (145) Adeona,(704) Interamnia,(779) Nina, and (1474) Beira // *The Six Moscow Solar System Symposium*.– 2015. – Abstract #6MS3-SB-06.
 50. Capria M.T. Sublimation mechanisms of Comet Nuclei//*Earth, Moon, and Planets*. – 2002. – Vol. 89, №1 – P. 161-178.
 51. Chapman C.S. Type Asteroids, Ordinary Chondrites, and Space Weathering: The evidence from Galileo’s Fly-bys of Gaspra and Ida//*Meteoritics*. — 1996. —Vol.31. — P. 699-725.
 52. Consolmagno G.J., Britt D.T, Macke R.J. What density and porosity tell us about meteorites//*LPI Contrib*.— 2008. — No.1391. —P.1582.

53. Consolmagno G.J., Britt D.T. The density and porosity of meteorites from the Vatican collection//Meteoritics and Planetary Sci. —1998. —Vol.33. — P.1231-1241.
54. Cox A.N., Pilachowski C.A. Allen's Astrophysical Quantities//Physics today. 2000. —Vol. 53.—P.77–92.
55. Cruikshank D.P. et al. Constraints on the Composition of Trojan Asteroid 624 Hektor// Icarus. — 2001. — Vol. 153. —P.348—360.
56. Cruikshank D.P., Brown R.H. The nucleus of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1//Icarus. — 1983. — Vol. 56. — P. 377 – 380.
57. Dahlgren M., Lagerkvist C.I. A study of Hilda asteroids. I CCD spectroscopy of Hilda asteroids//Astron. and Astroph. J. — 1995. —Vol. 302. — P. 907-914.
58. Dandy C.L. et al. Optical colors of 56 near-Earth objects: trends with size and orbit //Icarus. — 2011. — Vol. 163. — №. 2. — P.363—373.
59. David G.M., Stephen E.L., Blaise C. Harold D.A. et., al. The USNO-B catalog//Astron. J. — 2003. — Vol. 125. — P. 984–993.
60. Emel'yanenko V. V., Asher D. J., Bailey M. E. A Model for the Common Origin of Jupiter Family and Halley Type Comets// Earth, Moon, and Planets.— 2013.— Vol. 110, Issue 1-2. —P. 105-130.
61. Fernandez Y. R., Jewitt D., Ziffer J. E. Albedos of Small Jovian Trojans//The Astronomical Journal. —2009. — Vol.138. — P. 240–250.
62. Fernandez Y.R. et al. Analysis of POSS Images of Comet-Asteroid Transition Object 107P/1949 W1 (Wilson-Harrington)//Icarus. — 1997. — Vol. 128. — №. 1. — P. 114-126.
63. Ferraz-Mello S.et al. The depletion of the Hecuba gap vs the long-lasting Hilda group//Planetary and Space Science. — 1998. — Vol.46. — P.1425-1432.
64. Finson M.L., Probstein R.F. A theory of dust comets. I. Model and equations//The Astronomical Journal. —1968. — Vol.154. — P. 353–380.

65. Gehrels T., Wisniewski W.Z., Zellner B.H. Photometry of small asteroids and cometary//NASA, Washington Reports of Planetary Astronomy. – 1985b. – P. 89 (SEE N87-12407 03-89).
66. Gil-Hutton R., Garsia-Migani E. Comet candidates among quasi-Hilda objects//Astronomy and Astrophysics. – 2016. – Vol. 590. – Article id. A111.
67. Gil-Hutton R., Garsia-Migani E. Comet candidates among quasi-Hilda objects// Astronomy and Astrophysics. — 2016. — Vol.590. — A111.
68. Green D. W.E. et al. The strange periodic comet Machholz//Science. – 1990. – Vol. 247. – P.1063-1067.
69. Greenberg J. M., Li A. Morphological Structure and Chemical Composition of Cometary Nuclei and Dust//Space Sci. Reviews.— 1999. —V. 90. —P. 149-161.
70. Gronkowski P., Smela J. The cometary outbursts at large heliocentric distance//Astronomy and Astrophysics. — 1998. — Vol. 338. — P.761-766.
71. Hainaut O.R. et al. Continued activity in P/2013 P5 PANSTARRS. Unexpected comet, rotational break-up, or rubbing binary asteroid? //Astron. Astrophys. —2014. — Vol.563. — A75.
72. Harris A.W. On the slow rotation of asteroids//Icarus. — 2002. —Vol.156. — P.184-190.
73. Harris A.W. Tumbling asteroids//Icarus. – 1994. – Vol. 107. – P. 209–211.
74. Hartman W.K., Tholen D.J., Cruikshank D.P. The relationship of active comets, extinct» comets, and dark asteroids// Icarus. — 1987. —Vol.69. — P. 33-50.
75. Henden A. A.et al. VizieR online data catalog: AAVSO photometric all sky survey (APASS) DR9 (Henden+2016)// VizieR Online Data Catalog. — 2016. — II-336.
76. Henden A.A., Levin S., Terrel D., Welch D.L., Munari U., Kloppenbord B.K. APASS Data Release 10//American Astron. Soc. – 2018. – Vol. 232. – P. 223–226 .

77. Holmberg J., Flynn C., Portinari L. The colours of the Sun//MNRS. —2006. —Vol.367, №2. —P.449-453.
78. Homepage of Period04 (computer program) Режим доступа: <http://www.univie.ac.at/tops/Period04/> (дата обращения 08.12.2017).
79. Hosek Jr.M.W. Outburst dust production of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1//The Astronomical Journal. — 2013. —Vol.145, №5 — Id.122.
80. Hsieh H. Active Asteroids: Main-Belt Comets and Disrupted Asteroids// Proc. IAU. –2016. –Vol. 29A.– P. 237-240.
81. Hsieh H. H. Comets among the Asteroids: Icy bodies in the Inner Solar System//A dissertation Doctor of philosophy in Astronomy. – 2007. – P. 561 – 563. – 349 p.
82. Hsieh H. H., Jewitt D. A population of comets in the main asteroid belt//Science. – 2006. – Vol. 312. – P. 561 – 563.
83. Hsieh H., Jewitt D. A Population of Comets in the Main Asteroid Belt//Science. — 2006. — Vol.312. — №5773. — P.561-563.
84. Hsieh H., Jewitt D. Main Belt Comets: Ice in the inner Solar System//Bull. Americ. Astron. Soc.– 2006. –Vol.38. –492 p.
85. Hsieh, H. H., Jewitt, D., & Fernandez, Y. R. Albedos of Main-Belt Comets 133P/Elst-Pizarro and 176P/LINEAR// The Astrophysical Journal Letters. – 2009a. – Vol. 694. № 2. – P. 111–114.
86. Hsieh, H. H., Jewitt, D., Ishiguro, M. Physical Properties of Main-Belt Comet P/2005 U1 (Read)// The Astronomical Journal. – 2009b. – Vol. 137. № 1. – P. 157–168.
87. <http://www.comet-toolbox.com/FP.html>, 2021 г.
88. <http://www.ifa.hawaii.edu/info/press-releases/2019LD2/>"UH ATLAS telescope discovers first-of-its-kind asteroid". Institute for Astronomy. University of Hawai‘i. 20 May 2020. Retrieved 21 May 2020. (Дата обращения февраль 2021 г.).
89. <http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K07/K07W46.html>.

90. <https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimages> 9, 2021 г.
91. Interactive Data Language Режим доступа:
(<https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/IDL>).
92. Ivanova O.V.et., al. Photometric and spectroscopic analysis of Comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 activity//Planet. Space Sci. – 2016. – Vol. 121. – P.10 – 17.
93. Jewitt D. Continuous Activity in Comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1//ACM III. —1990. —P.347.
94. Jewitt D. Introductory report: Physical properties of cometary nuclei//Proc. Liege Inst. Astrophys. Colloq.30. — 1992. — P. 85-111.
95. Jewitt D. The active asteroids//Astronomical Journal. – 2012. – Vol. 143, №. 3. – P. 66.
96. Jewitt D., Hsieh H., Agarwal J. The active of asteroids//Asteroids IV. – 2015. – P. 221-241.
97. Jewitt D., Kalas P. Thermal observations of Centaur 1997 CU26//Astrophysical Journal. – 1998. – Vol. 499. L103–L106.
98. Jewitt D., Kalas P. Thermal observations of Centaur 1997 CU26//The Astrophysical Journal. — 1998. – Vol.499. — L103–L106.
99. Jewitt D., Li. J., Kim Y. Fragmenting active asteroid 331P/Gibbs//Astronomical Journal. – 2021.– Vol. 162. – №. 6. – Id. 268, 14pp.
100. Jewitt D., Luu J. Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB1//Nature. – 1993. – Vol. 362. – P. 730 – 732.
101. Jewitt D., Luu J. Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB1//Nature. – 1992. – Vol. 362. – P.730–732.
102. Jewitt D., Luu J., Trujillo C. Large Kuiper Belt Objects: The Mauna Kea 8K CCD Survey//The Astron. J. – 1998. – Vol. 115. – P. 2125-2135.
103. Jewitt D., Luu J., Trujillo C. Large Kuiper Belt Objects: The Mauna Kea 8K CCD Survey//The Astronomical Journal. — 1998. Vol. 115. P. 2125-2135.

104. Jewitt D., Stuart S., Li J. Prediscovery Observations of Disrupting Asteroid P/2010 A2//The Astronomical Journal. —2011. —Vol.142, №1. —Id.28, 9pp.
105. Jewitt D., Yang B., Haghhighipour N. Main belt of asteroids Comet P/2008 (Garradd)// The Astronomical Journal. – 2009. – Vol. 137. – P. 4313-4321
106. Jewitt D.et al. Episodic Ejection from Active Asteroid 311P/PanStarrs// Astrophysical Journal. —2015. — Vol.798, № 2. — Id. 109, 12 pp.
107. Jewitt D.et al. Water in Small Bodies of the Solar System//Protostars and Planets V. - 2007. – P. 863–878.
108. JPL Small-Body Database – Режим доступа: <http://ssd.jpl.nasa.gov/>(дата обращения: 2019).
109. JPL Small-Body Database – Режим доступа: <http://ssd.jpl.nasa.gov/ssdb.cgi> (дата обращения: 10.09.2021).
110. JPL Small-Body Database – Режим доступа: <http://ssd.jpl.nasa.gov/ssdb.cgi> (дата обращения: 03.02.2022).
111. JPL Small-Body Database – Режим доступа: <http://ssd.jpl.nasa.gov/>(дата обращения: 10.09.2017).
112. JPL Small-Body Database – Режим доступа: <https://ssd.jpl.nasa.gov> (дата обращения: 2022).
113. JPL Small-Body Database: P/2019 LD2. (2020-05-19 last obs.)//Jet Propulsion Laboratory, Retrieved 21 May 2020. (Дата обращения февраль 2021 г.).
114. Kokhirova G.I., Ivanova O.V., Rakhmatullaeva F. Dzh et al. Astrometric and photometric observations of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 at the Sanglokh international astronomical observatory// Planetary and Space Science. — 2020. — Vol. 181. — Article id. 104794. (7 p.).
115. Kosai H. Short-period comets and Apollo-Amor-Aten type asteroids in view of Tisserand invariant//Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. – 1992. Vol. 54. – P. 237–240.

116. Kresak L. Dynamical interrelation among comets and asteroids//Asteroids. — (A80-24551 08-91). — 1979. — P. 289-309.
117. Kresak L. On the similarity of orbits of associated comets, asteroids and meteoroids//Bull. Astron. Czech. — 1982. — Vol. 33. — P. 104–110.
118. Kresak L. The discrimination between cometary and asteroidal meteors. I. The orbital criteria//Bull. Astron. Czech. — 1969. — Vol. 20. — № 4. — P. 177–188.
119. Lamy P. L., Toth I., Fernandez Y.R., Weaver H.A. The Sizes, Shapes, Albedos, and Colors of Cometary Nuclei//Comets II. — 2004. — P. 223-264.
120. Landsman W.B. The IDL astronomy user's library//Astron. Data Analysis Software and Systems II. A.S.P. Conference Series. — 1993. — Vol. 52. — P. 246–248.
121. Larson S., Kowalski R., Sato H., Yoshimoto, K. Nakano S. 596 (Scheila)//CBET. — 2010. - № 2583. — P. 1.
122. Larson S.M. (596) Scheila//IAUC. — 2010. - № 9188.
123. Larson S.M., Sekanina Z. Coma morphology and dust-emission pattern of periodic Comet Halley. I - High-resolution images taken at Mount Wilson in 1910//Astronomical Journal. — 1984. — Vol. 89. — P. 571–578.
124. Levison H., Duncan M. From the Kuiper Belt to Jupiter-Family Comets: The Spatial Distribution of Ecliptic Comets//Icarus. — 1997. — Vol. 127. — №. 1. — P. 13-32.
125. Levison H. F., Duncan M. J. From the Kuiper Belt to Jupiter-Family Comets: The Spatial Distribution of Ecliptic Comets//Icarus. — 1997. — Vol. 117. — L.13.
126. Licandro J. et al. Observations of Comet P/2019 LD2 (ATLAS) with the 10-m Gran Telescopio Canarias (GTC)//Bulletin of the American Astronomical Society.— 2020.— Vol. 52, №6.—Id.404 (6pp).
127. Licandro J. et al. Spectral properties of asteroids in cometary orbits//Astronomy and Astrophysics. — 2008. —Vol.481, №3. — P. 861-877.

128. Lumme M. et al. Interplanetary propagation of relativistic solar protons//Solar Physics. —1986. —Vol.107. — P.183-194.
129. Luu J.X., Jewitt D. Periodic Comet Schwassmann- Wachmann 1//IAU Circular. —1993. — №5692.
130. Luu J.X. et al. Rotational Mass Shedding from Asteroid (6478) Gault //The Astrophysical Journal Letters. — 2021. — Vol. 910 №.2. — L.27.
131. M.P.C.908006 [Электронный ресурс].—URL:
<http://www.minorplanetcenter.net> (дата обращения 24.07.2018).
132. M.P.C.808122 [Электронный ресурс].—URL:
<http://www.minorplanetcenter.net> (дата обращения 27.07.2017).
133. Ma Y.H., Williams I.P., Ip W.H., Chen W. The velocity distribution of periodic comets and the meteor shower on Mars//Astronomy and Astrophysics. — 2002. — Vol. 394. — P. 311–316.
134. Mallama A. Sloan magnitudes for the brightest stars//Journal of American Association of Variable Star Observer. —2014. —Vol.42. —P.443.
135. Masiero J.R. et al. Preliminary Analysis of WISE/NEOWISE 3-Band Cryogenic and Post-Cryogenic Observations of Main Belt Asteroids //The Astrophysical Journal Letters. — 2012. — Vol. 759. — id. L8. 5 pp.
136. Meech K.J., Belton M.J.S., Mueller B.E.A., Dicksion M.W., Li H.R. Nucleus properties of 29P/Schwassmann- Wachmann 1//Astron. Journal. 1993. Vol. 106. P. 1222–1236.
137. Mommert et al. The Discovery of Cometary Activity in Near-Earth Asteroid (3552) Don Quixote//Astrophysical Journal. — 2014. — Vol. 781. — Article id. 25. 10p.
138. Mommert M., Polishook D., Moskovitz N. (3552) Don Quixote//CBET. —2018b.-№4502.-P.2.
139. Mommert M. et al. Systematic characterization and monitoring of potentially active asteroid: The case of Don Quixote//Americ.Astron. Soc. — 2018a. — DPS. id.505.05.

140. Morbidelli A., Gladman B. Orbital and temporal distributions of meteorites originating in the asteroid belt//Meteor and Planet. Sci.— 1998. — Vol. 33. — P. 999-1016.
141. Moreno F. et al. Water-ice-driven activity on main-belt comet P/2010 A2 (LINEAR)?// Astrophysical Journal Letter.— 2010. —Vol.718.— L132.
142. MPEC 2020-K134: Comet P/2019 LD2 (ATLAS). (Дата обращения 05.08.2020).
143. MPEC 2020-K134: COMET P/2019 LD2 (ATLAS)//Minor Planet Electronic Circular, Cambridge, Massachusetts: MPC, May 23, 2020. (Дата обращения февраль 2021 г.).
144. Munari U.et al. APASS discovery and characterization of 180 variable stars in Aquarius//The Journal of Astronomical Data. —2014. —Vol.—20. — P.4.
145. Neslushan L. et al. Dust productivity and impact collision of the asteroid 596 (Scheila)//Planetary and Space Science.— 2016.— Vol.125.— P.37-42.
146. Nesvorny D., Ferraz-Mello S. On the asteroidal population of the first –order Jovian resonances// Icarus. – 1997. – Vol. 130. –P.247—258.
147. Novaković B.et al. P/2006 VW139: A main-belt comet born in an asteroid collision//Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2012. – Vol. 424, № 2. – P. 1432-1441.
148. Öpik E. J. The stray bodies in the solar system. Part I. Survival of cometary nuclei and the asteroids //Adv. Astron. Astrophys. – 1963. – Vol. 2. – P. 219-262.
149. Penttila A., Shevchenko V.G., Wilkman O., Muinonen K.H. H, G1, G2 photometric phase function extended to low-accuracy data//Planet. Space Sci. – 2016. – Vol. 123. – P. 117–125.
150. Popova O., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A. et al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery and Characterization//Science. – 2013. – Vol. 342. – Issue 6162. – P.1069–1073.

151. Prialnik D. Bar-Nun A. Crystallization of amorphous ice as the cause of Comet P/Halley's outburst at 14 AU//Astronomy and Astrophysics. — 1992. — Vol. 258, №2 — L.9-L12.
152. Prialnik D. Modeling the Comet Nucleus interior// Earth, Moon, and Planets. — 2002. — Vol. 89, №1 — P. 27-52.
153. Rauer H. Ion composition and solar wind interaction Observations of comet C/1995 O1 (Hale-Bopp)//Earth, Moon, and Planets — 1997. — Vol. 79. — №1/3 — P. 161-178.
154. Richter N. Die Helligkeitsausbrüche des Kometen 1925 II und ihre Zusammenhänge mit der Sonnentätigkeit//Astronomische Nachrichten. — 1954. — Vol.281, №13 — P.241.
155. Richter N. Helligkeitsschwankungen der Kometen und Sonnentätigkeit. I Erster Schwassmann-Wachmannscher Komet (1925 II)//Astronomische Nachrichten. - 1941. — №5 — P.207.
156. Rickman H., Gustafson B.A.S., Fernandez J.A. Model Calculations of Mantle Formation on Comet Nuclei//ACM III. — 1990. P—. 423-426.
157. Roemer E. Activity in Comets at Large Heliocentric Distance// Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 1962. — Vol.74, №440 — P.351.
158. Roemer E. An Outburst of Comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1//Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 1958. — Vol.70. — №414 — P.272.
159. Russel H.N. On the Albedo of the Planets and Their Satellites//The Astrophysical Journal. – 1916. – Vol. 43. – P.173–196.
160. Sarid G. et al. 29P/Schwassmann-Wachmann 1, A Centaur in the Gateway to the Jupiter-family Comets//The Astrophysical Journal Letters. –2019. –Vol.883, №1. – L25, 7 pp.
161. Schubart J. Additional results on orbits of Hilda-Type Asteroids//Astronomy and Astrophysics. — 1991. — Vol.241. — P.297-302.

162. Sekanina Z. Catalogue of Cometary Orbits 1992// IAU Circular edited by Marsden B.G. – 1992. – №5483.
163. Sekanina Z. Periodic comet Machholz its idiosyncrasies//Astronomical Journal. – 1990. – Vol. 99. – №. 4. – P. 1268-1277.
164. Senay M.C., Jewitt D. Coma formation driven by carbon monoxide release from comet Schwassmann-Wachmann 1//Nature. – 1994. – P. 371–229.
165. Snodgrass C., Lowry S.C., Fitzsimmons A. Optical observations of 23 distant Jupiter Family Comets, including 36P/Whipple at multiple phase angles//MNRS. – 2008. – Vol. 385. – P.737–756.
166. Snodgrass C., Lowry S.C., Fitzsimmons A. Photometry of cometary nuclei: rotation rates, colours and a comparison with Kuiper Belt Objects// MNRS. — 2006. —Vol. 373. —P.1590–1602.
167. Software Astroart– Режим доступа: <http://www.msb-astroart.com>. (дата обращения: 10.12.2020)
168. Solontoi M.et al. Ensemble properties of comets in the Sloan Digital Sky Survey//Icarus. – 2012. – Vol. 218, Issue 1. – P. 571–584.
169. Stansberry J.A. et al. Spitzer Observations of the Dust Coma and Nucleus of 29P/Schwassmann-Wachmann 1//The Astrophysical Journal Supplement Series- 2004. — Vol. 154. — P. 463-468.
170. Stevenson R.et al. Characterization of active main belt object P/2012 F5 (Gibbs): A possible impacted asteroid//Astrophysical. Journal. — 2012. — Vol.759. —P. 142—155.
171. Tedesco E.F., Desert F.X. The infrared space observatory deep asteroid search//Astrophysical Journal. — 2002. —Vol.123. —P. 2070-2082.
172. The International Astronomical Union Minor Planet Center [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.minorplanetcenter.net/> (дата обращения: 10.09.2018 г.).
173. The International Astronomical Union Minor Planet Center [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.minorplanetcenter.net/> (дата обращения: 2019 г.)

174. The International Astronomical Union Minor Planet Center [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.minorplanetcenter.net/> (дата обращения: 15-16.03.2020 г.).
175. Tholen D.J. Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Photometry// Ph. D. Thesis, Univ. of Arizona. – 1984. (167pp).
176. Trigo-Rodriguez J.M., Garcia-Hernandez D.A., Sanchez, A. et al. Outburst activity in comets - II. A multiband photometric monitoring of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1//MNRAS. –2010. – Vol.409. –P. 1682-1690.
177. University of Arizona news [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.arizona.edu/> (дата обращения: 01.06.2011).
178. Veeder G. J.et.al Radiometry of Near-Earth Asteroids//The Astron. Journal. — 1989. —Vol.97. — P. 1211-1219.
179. Weissman P. R. A.Hearn M.F., McFadden L.A., Rickman H. Evolution of comets into asteroids//Asteroids II. – 1989. – Vol. 205. – P. 880-920.
180. Weissman P., Bottke W., Levison H. Evolution of Comet into Asteroid// Asteroids III. – 2002. – P. 669-686.
181. Whipple F.L. A comet model I. The acceleration of comets// Astrophysical Journal. –1950. –Vol. 111. – № 2. – P. 375–394.
182. Whipple F.L. A comet model II. Physical relation for comets and meteors//Astrophysical Journal. – 1951. – Vol.113. – № 3. – P. 464–474.
183. Whipple F.L. A Comet Model. III. The Zodiacal Light//Astrophysical Journal. – 1955. – Vol.121. – P. 750–770.
184. Whipple F.L. Rotation and outbursts of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1// The Astronomical Journal. — 1980. — Vol. 85. —P.305-313.
185. Williams T.R. et al. Explosion of Comet 17P/Holmes as revealed by the Spitzer Space Telescope// Icarus. — 2010. –Vol. 208. – P. 276–292.
186. Zellner B., Thirunaqari A., Bender D. The large-scale structure of the asteroid belt // Icarus. – 1985. – Vol. 62. –P.505–511.

ПРИЛОЖЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ПЗС – Прибор с зарядовой связью
- ИА НАНТ – Институт астрофизики Национальной академии Таджикистана
- ГисАО – Гиссарская астрономическая обсерватория
- МАОС – Международная астрономическая обсерватория Санглох
- КрАО – Крымской астрофизической обсерватории Российской академии наук
- АА – Активный астероид
- ГПА – Главный пояс астероидов
- КГП – Кометы главного пояса
- АСЗ – Астероид, сближающийся с Землей
- ПП – программный пакет
- РАН – Российская академия наук
- СНГ – Содружество Независимых Государств
- MPC – Minor planet center
- IAU – International Astronomical Union
- CCD – матрица - charge-coupled device
- FLI – Finger Lakes Instrumentation
- FOV – Field of view – поле зрения
- PSF - point spread function
- APASS – AAVSO Photometric All-Sky Survey
- JFC (Jupiter Family Comets) - кометы семейства Юпитера
- KBO (Kuiper belt objects) объекты пояса Койпера
- LPC (Long period comets) долгопериодические кометы
- США – Соединенные Штаты Америки
- ГАО – Главная астрономическая обсерватория (Пулковская) РАН
- ИНАСАН – Институт астрономии РАН
- MPEC – Minor Planet Electronic Circulars

UT – Universal Time

JD – Julian date

FWHM – Full Width at Half Maximum

ЭПОС – Эфемеридная Программа для Объектов Солнечной системы

АПЕКС – программная система для обработки ПЗС-изображений

NEOWISE – Near-Earth Object Wide-field Infrared Survey Explorer

NAIC – National Astronomy and Ionosphere Center

NASA – National Aeronautics and Space Administration

JPL – Jet Propulsion Laboratory

DAMIT – Database of Asteroid Models from Inversion Techniques

ALCDEF – Asteroid Lightcurve Data Exchange Format