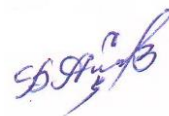


АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ АСТРОФИЗИКИ

На правах рукописи



БУРИЕВ Анварджон Махмадалиевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ
ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗБРАННЫХ КОМЕТ И АСТЕРОИДОВ ПО
ДАНЫМ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ**

01.03.01 – астрометрия и небесная механика

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
член-корреспондент АН Республики Таджикистан,
доктор физико-математических наук,
Кохирова Гулчехра Исроиловна

Научный консультант:
член-корреспондент АН Республики Таджикистан,
доктор физико-математических наук
Ибадинов Хурсандкул Ибадинович

Душанбе – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА I. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ КОМЕТ И АСТЕРОИДОВ	25
1.1. Оптические наблюдения комет и астероидов	25
1.2. Методика астрометрической обработки изображений, определение координат и элементов орбит объектов	34
1.3. Методика фотометрической обработки, определение звездных величин и других физических параметров объектов	40
1.4. Анализ точности результатов астрометрии с использованием различных программных комплексов	46
Выводы по главе I	56
ГЛАВА II. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ КОРОТКОПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ	57
2.1. Результаты наблюдений кометы 17P/Холмса	57
2.1.1. Исследование деления ядра кометы 17P/Холмса	64
2.2. Оптические наблюдения кометы 41P/Туттля-Джакобини- Кресака	69
2.2.1. Определение координат, траектории и орбиты кометы	72
2.2.2. Определение видимых и абсолютных звездных величин, показателей цвета и оценка диаметра ядра кометы 41P/Туттля-Джакобини-Кресака	77
2.3. Оптические наблюдения кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1	83
2.3.1. Определение динамических свойств кометы	87
2.3.2. Исследование физических параметров кометы 29P	91
2.3.3. Морфология комы кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1	96
Выводы по главе II	100

ГЛАВА III. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ, НА ОСНОВЕ ИХ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ	102
3.1. Результаты квазисинхронных наблюдений потенциально опасного астероида 2014 JO25	102
3.1.1. Исследование динамических свойств астероида	109
3.1.2. Определение орбиты астероида и ее улучшение	116
3.1.3. Определение физических свойств 2014JO25	124
3.2. Квазисинхронные наблюдения потенциально опасного астероида 2007 WV4	131
3.2.1. Определение координат и орбиты астероида	134
3.2.2. Определение физических особенностей астероида	138
Выводы по главе III	141
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	143
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	145
ПРИЛОЖЕНИЕ	161

ВВЕДЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена исследованию динамических и физических характеристик избранных короткопериодических комет и астероидов, сближающихся с Землей. Для решения поставленной задачи в астрономических обсерваториях Института астрофизики АН РТ выполнены оптические наблюдения комет и астероидов с последующей астрометрической и фотометрической обработкой полученных изображений. Получены новые данные о динамических и физических свойствах исследованных объектов, позволяющие улучшить понимание природы объектов из различных популяций малых тел Солнечной системы, а также способствуют выявлению общностей и различий между ними. Особое внимание уделено кометам семейства Юпитера, происхождение которых согласно современным представлениям связано с объектами пояса Койпера.

Приведем краткое описание объектов исследования согласно определениям, принятым недавно Международным Астрономическим Союзом [1]. 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. Поскольку в работе исследуются астероиды, сближающиеся с Землей, то приведем определение таких объектов. 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.

Существует множество процессов, связанных с образованием и эволюцией комет, которые могут влиять на физические свойства ядер комет. Даже если бы существовал общий механизм формирования всех кометных ядер, разнообразие могло бы сохраняться из-за различий в физических и химических условиях на разных гелиоцентрических расстояниях. Поэтому не следует ожидать, что кометы образуют однородную группу по своим физическим свойствам, и существует необходимость исследовать возможные корреляции этих свойств с местом происхождения кометы и ее последующей историей, а также сравнение этих свойств с кометами других подгрупп. С этим связана одна из целей данного исследования.

Исследование условий деления ядра короткопериодической кометы на примере кометы 17P/Холмса является еще одной целью данной работы. Деление, а иногда и разрушение ядра относится к наиболее катастрофичным проявлениям нестационарной активности комет. На основе оптических наблюдений деления ядра кометы 17P/Холмса и обработки материала изучены условия деления ядра и получены качественные оценки скорости разлета фрагментов ядра, позволяющие сделать заключение о причинах этого явления.

В настоящий момент имеется несколько доступных баз данных наземных наблюдений астероидов, которые содержат элементы орбит, информацию о блеске и кривых блеска, сведения о физических свойствах известных астероидов. Тем не менее, оптические наземные наблюдения астероидов продолжают сохранять значимость и актуальность. Поскольку не для всех астероидов определена орбита, диаметр и геометрическая форма, структура и состав поверхности, период и ориентации оси вращения и др. параметры. Эти задачи становятся особенно актуальными, когда рассматриваются потенциально опасные астероиды. Наблюдения и изучение таких астероидов являются еще одной целью представленной работы. Крайне важно иметь как можно больший набор наблюдательных данных по таким астероидам, для того, чтобы получать

более точные орбиты, блеск, периоды вращений, диаметры, показатели цвета и, по крайней мере, предположительный минералогический состав тел.

Актуальность работы

Кометы и астероиды образуют популяцию малых тел Солнечной системы. Кометные ядра и астероиды образовались миллиарды лет назад в период формирования Солнечной системы, следовательно, их возраст сравним с возрастом Солнечной системы. Их динамическое время жизни различно [1], различны также и источники их происхождения. Об этом свидетельствует их состав, внутренняя структура и температура испарения материала. Тем не менее, вещество и комет, и астероидов благодаря сравнительно малым массам объектов сохранилось практически в первозданном виде и представляет собой первичный материал, из которого формировалась Солнечная система на ранних и последующих стадиях эволюции. В связи с этим кометы и астероиды имеют чрезвычайно важное место в астрономических исследованиях, их изучение обеспечивает получение сведений об условиях и процессах возникновения Солнечной системы.

Существует множество процессов, связанных с образованием и эволюцией комет, которые могут влиять на физические свойства ядер комет. Даже если бы существовал общий механизм формирования всех кометных ядер, разнообразие могло бы сохраняться из-за различий в физических и химических условиях на разных гелиоцентрических расстояниях. Поэтому не следует ожидать, что кометы образуют однородную группу по своим физическим свойствам, и существует необходимость исследовать возможные корреляции этих свойств с местом происхождения кометы и ее последующей историей, а также сравнение этих свойств с кометами других подгрупп. Эти проблемы рассмотрены в данной диссертации.

Особо отметим исследование условий деления ядра короткопериодической кометы 17P/Холмса, приведенное в работе. Деление, а

иногда и разрушение ядра относится к наиболее катастрофичным проявлениям нестационарной активности комет. Для выявления причин и условий таких нестационарных процессов необходимы дополнительные исследования, особенно, если учесть, что каждый такой случай является сугубо индивидуальным. Детальный анализ позволит установить общности и различия явлений деления, и, следовательно, выявить закономерности таких процессов.

Оптические наземные наблюдения астероидов продолжают сохранять значимость и актуальность. Поскольку не для всех астероидов определены диаметры и геометрическая форма, структура и состав поверхности, период и ориентации оси вращения и другие параметры. Эти задачи становятся особенно актуальными, когда рассматриваются потенциально опасные астероиды. Крайне важно иметь как можно больший набор наблюдательных данных по таким астероидам, для того, чтобы получать более точные орбиты, звездные величины, периоды вращений, диаметры, показатели цвета и, по крайней мере, предположительный минералогический состав тел. Наблюдения и изучение таких астероидов являются еще одной проблемой, рассмотренной в диссертации.

Вышеприведенные факты составляют фундаментальную значимость исследования комет и астероидов.

Есть еще и практическая значимость этого вопроса. Она 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. События, произошедшие в районе реки Подкаменная Тунгуска в 1908 г. [3] и в Челябинской области в 2013 г. [4,5], показали, насколько опасным может быть вторжение комет и астероидов в земную атмосферу. Эти и другие известные факты подтверждают реальность космических угроз для Земли. Последствия столкновений сильно зависят и от скорости входа тела в земную атмосферу, и

от его состава, известно, что условия пролета каменных и ледяных объектов в земной атмосфере различаются. Для выработки стратегий предотвращения и смягчения опасных столкновений необходимо иметь максимально возможный перечень опасных тел и знать характеристики каждого объекта. Такие сведения позволяют достоверно характеризовать группировки опасных тел, источники их происхождения, следовательно, сделать оценки вероятности возможных ударов [6,7]. 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 короткопериодических комет и потенциально опасных астероидов по данным оптических наблюдений. Для достижения поставленной цели в диссертации на основе выполненных оптических наблюдений избранных комет и астероидов и астрометрической и фотометрической обработки изображений объектов, решены следующие задачи:

1. Определены координаты и вычислена орбита кометы 17P/Холмса. Исследованы условия деления ядра кометы, определены скорость разлета фрагментов и момент деления ядра.
2. Определены координаты, орбита, блеск, кривые блеска, эффективный диаметр ядра, показатели цвета кометы 41P/Туттля - Джакобини - Кресака. Выполнен сопоставительный анализ полученных результатов с имеющимися данными по кометам из различных популяций, и интерпретация результатов.
3. Определены координаты, орбита, блеск, кривые блеска, эффективный диаметр ядра, показатели цвета кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1,

относящейся к активным объектам группы Кентавров. Мониторинг проведен в период вспышечной активности кометы. По методу выделения низко контрастных структур в кометной коме построены изображения кометы, к которым применен алгоритм Ларсона-Секанины [8]. Изучена морфология и выявлены пылевые структуры в коме кометы. Выполнен сопоставительный анализ полученных результатов с имеющимися данными по кометам из различных популяций, и интерпретация результатов.

4. Определены координаты и орбиты потенциально опасных астероидов 2014 JO25 и 418094 (2007 WV4) с использованием данных квазисинхронных наблюдений Уссурийской астрофизической обсерватории ДВО РАН, Гиссарской астрономической обсерватории (ГисАО) и Международной астрономической обсерватории Санглох (МАОС) Института астрофизики Академии наук Республики Таджикистан (ИА АН РТ), Звенигородской обсерватории Института астрономии Российской академии наук (ИНАСАН), Главной (Пулковской) обсерватории РАН (ГАО РАН) и Кисловодской горной астрономической станции ГАО РАН. Показана эффективность проведенной кампании квазисинхронных наблюдений астероидов для определения координат и вычисления орбит. Выявлено, что при имеющейся точности астрометрических наблюдений для построения орбиты параллактический угол должен составлять не менее 10 угловых минут, а продолжительность одновременных наблюдений двух обсерваторий должна быть не менее одного часа.
5. По данным наблюдений в обсерваториях Института астрофизики АН РТ (ИА АН РТ) построена первоначальная орбита астероида 2014 JO25 и выполнено ее улучшение.

6. Определены физические особенности астероидов 2014 JO25 и 418094 (2007 WV4): видимый и абсолютный блеск, кривые блеска, период вращения, эффективный диаметр, показатели цвета и предположительная минералогия, проведен анализ и интерпретация результатов.
7. Выполнен сопоставительный анализ точности астрометрической обработки изображений с использованием различных программных пакетов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Определены координаты и орбита кометы 17P/Холмса по наблюдениям, выполненным в период ее вспышки. Установлена фрагментация ядра и исследованы условия его деления. Установлено время распада ядра и определена скорость разлета фрагментов ядра. На основе полученной оценки скорости и ее сопоставления со скоростями, обусловленными различными механизмами деления ядра, сделано предположение, что причиной деления ядра кометы 17P/Холмса и, как следствие, вспышки блеска, явилось столкновение кометы с другим космическим объектом.
2. Определены координаты, орбита, видимый и абсолютный блеск, и показатели цвета кометы 41P/Туттля - Джакобини - Кресака по квазисинхронным наблюдениям в двух обсерваториях. Получена оценка диаметра кометы. Интерпретация результатов и сравнительный анализ полученных новых данных с имеющимися данными по этой комете и кометам других семейств указывают на принадлежность кометы 41P/Туттля - Джакобини - Кресака к активным кометам семейства Юпитера.
3. Определены динамические и физические свойства кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 по наблюдениям, выполненным в период вспышечной активности кометы. Изучена морфология и выявлены пылевые структуры в

коме кометы. На основе полученных характеристик и их сопоставления с имеющимися данными по кометам других семейств подтверждена принадлежность кометы к активным объектам группы Кентавров. Выброс нейтрального газа СО вследствие кристаллизации аморфного льда на поверхности ядра рассмотрен как один из наиболее вероятных механизмов, ответственных за кометную активность на больших гелиоцентрических расстояниях. Показано, что увеличение газопроизводительности влечет за собой усиление пылеобразования, что приводит к резкому увеличению блеска объекта, т.е. к вспышке.

4. Методом триангуляции определены положения и орбита потенциально опасного астероида 2014 JO25 по данным квазисинхронных наблюдений шести обсерваторий в период его сближения с Землей. Определены координаты и вычислена орбита астероида по данным наблюдений двух обсерваторий ИА АН РТ, выполнено улучшение первоначальной орбиты. Определены видимый и абсолютный блеск, эффективный диаметр, период вращения и показатели цвета астероида. Предположена таксономическая классификация, свойственная астероидам групп G,V или Q.
5. Определены положения и видимый блеск потенциально опасного астероида 418094 (2007 WV4) по данным квазисинхронных наблюдений трех обсерваторий в период его сближения с Землей. Найдены координаты и вычислена орбита по наблюдениям в Гиссарской астрономической обсерватории ИА АН РТ. Установлены видимый и абсолютный блеск, эффективный диаметр и период вращения объекта.
6. Выполнен сопоставительный анализ точности получаемой астрометрической обработки с использованием различных программ. Показана приемлемая точность астрометрических измерений, полученная

вследствие адаптации и внедрения программного пакета АПЕКС-II [9] для астрометрии (и фотометрии) изображений объектов.

Научная новизна

1. Зарегистрированы вспышечная активность и деление ядра кометы 17P/Холмса в период наблюдений в октябре-ноябре 2007 г. Установлен момент фрагментации ядра и определена скорость разлета фрагментов, согласующаяся с другими данными [10-12]. Оценка скорости разлета фрагментов подтверждает предположение, что деление ядра явилось результатом его столкновения с другим объектом. Вычислена орбита кометы после деления ядра и показано, что она сохранила стабильность, следовательно, столкновение не было катастрофичным, и не привело к изменению элементов орбиты.
2. По наблюдениям кометы 41P/Туттля - Джакобини - Кресака в 2017 г. в двух обсерваториях ИА АН РТ определены координаты и вычислена орбита, согласующаяся с орбитой МРС. Показано, что сближение с Землей на минимальное расстояние не повлияло на стабильность орбиты кометы. Найдены показатели цвета кометы, на основе их сопоставительного анализа с величинами для комет других семейств и с учетом динамических свойств подтверждена принадлежность 41P/Туттля - Джакобини - Кресака к кометам семейства Юпитера. Эффективный диаметр, найденный из наблюдений, является фотометрической оценкой, и размер ядра нуждается в дальнейшем уточнении.
3. В период наблюдений кометы 29P/Швассмана- Вахмана 1 впервые в 2017 г. зарегистрирована вспышечная активность на больших гелиоцентрических расстояниях. Построена морфология кометы и в ее коме выявлены две пылевые структуры, подтверждающие активную фазу, проявившуюся в

виде выброса пыли. Предложен механизм, ответственный за наблюдаемую активность и объясняющий причины выброса пылевых частиц на больших гелиоцентрических расстояниях. Орбита, вычисленная по найденным координатам, и показатели цвета 29P/Швассмана-Вахмана 1, определенные из фотометрии, соответствуют активным объектам группы Кентавров.

4. Впервые в результате квазисинхронных наблюдений (шесть обсерваторий) двух потенциально опасных астероидов методом триангуляции найдены их координаты и вычислены орбиты. Первоначальная орбита астероида 2014 JO25 по наблюдениям в двух обсерваториях ИА АН РТ была улучшена, в результате получена орбита близкая к орбите MPC. На основе найденных показателей цвета и таксономической классификации впервые предположен минералогический состав астероидов.
5. Значительно улучшено качество и точность определения координат и звездных величин объектов, благодаря впервые внедренному в ИА АН РТ программному пакету АПЕКС-II для астрометрической и фотометрической обработки изображений объектов.
6. С помощью телескопа Цейсс-1000, восстановленного и модернизированного в 2016 году в Международной астрономической обсерватории Санглох ИА АН РТ впервые выполнены многоцветные наблюдения избранных комет и астероидов, подтверждающие приемлемость использования инструмента для наблюдений малых тел Солнечной системы.

Научная и практическая значимость

Всестороннее исследование физико-динамических особенностей малых тел Солнечной системы по данным оптических наблюдений имеет не только

фундаментальное значение для установления их происхождения и взаимосвязей, но и важное прикладное значение.

1. Результаты исследования нестационарной активности кометы 17P/Холмса и выявление обстоятельств вспышки и деления ядра имеют важное значение для изучения такой активности в случаях ее проявления у других комет. Такие события нередки, и для лучшего понимания их природы необходимо иметь больше данных по индивидуальным случаям. Оценка скорости разлета фрагментов, найденная из наблюдений, необходима для установления однозначной причины деления ядра в других отдельно рассматриваемых явлениях.
2. Использованный подход для подтверждения принадлежности кометы 41P/Туттля - Джакобини - Кресака к семейству Юпитера, учитывающий и динамические, и физические свойства кометы, найденные из наблюдений, может быть применен и для других комет.
3. Результаты исследования кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 имеют большое значение для лучшего понимания динамики и природы активных объектов группы Кентавров. Для получения всесторонних сведений об этих объектах с двойственными свойствами необходимо детально изучать каждый из них отдельно. Предложенный механизм ответственный за активность на больших гелиоцентрических расстояниях может быть применен к другим объектам с аналогичной активностью.
4. Результаты квазисинхронных наблюдений способствуют определению триангуляционным методом точных положений объектов и вычисления их орбит, что является особенно актуальным для потенциально опасных

астероидов, для прогноза их движений необходимы наиболее точные сведения об их орбитах.

5. Полученные из наблюдений новые результаты о физических и динамических свойствах комет и астероидов существенно дополняют имеющиеся в различных базах данные по этим объектам. Они необходимы для решения современных проблем астрономии, связанных с изучением условий образования Солнечной системы, для определения источников происхождения и выявления связей между малыми телами Солнечной системы, с исследованием обстановки в околоземном космическом пространстве.
6. Результаты исследований важны для учета астероидно-кометной опасности для космических миссий, необходимы для решения проблемы астероидно-кометной опасности столкновения с Землей, а также помогут в постановках новых научных задач во время проведения наблюдений АСЗ космическими аппаратами.

Достоверность

Научные результаты и выводы, полученные в работе, достоверны, основываются на фактическом наблюдательном материале и на использовании современных объективных методов исследований, как разработанных в ИА АН РТ и в ведущих зарубежных астрономических учреждениях, так и новых, разработанных диссертантом. Первоначальные данные объектов, избранных для исследования, взяты из астрономических баз данных NEODYS, JPL Small-Body Database, NEOWISE [13-15], и др. Методы и результаты, полученные на их основе, уже апробированы и доказали свою высокую степень достоверности и надежности.

Сравнительный анализ всех полученных результатов с соответствующими опубликованными результатами по наблюдениям и по теоретическим исследованиям, с применением разных методов, показал хорошее соответствие между ними, что также подтверждает достоверность результатов, представленных к защите.

Различные аспекты работы, положенные в основу диссертации, прошли экспертизу и выполнялись по темам научных исследований Отдела физики комет и астероидов Института астрофизики АН РТ.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах «Малые тела Солнечной системы» Института астрофизики АН РТ, ИКИ РАН, Шемахинской Астрофизической Обсерватории им. Н.Туси, Азербайджан, а также были представлены на научных республиканских и международных конференциях:

- Международная конференция «Состояние и перспективы астрономических исследований в Таджикистане», посвященная 75-летию Института астрофизики Академии наук Республики Таджикистан, Душанбе, 22-23 ноября 2007 г.,
- Международная конференция «Современные проблемы физики», ФТИ им. С. Умарова АН РТ, Душанбе, 29-30 октября 2010 г.,
- Международная конференция стран СНГ «50 лет космической эры- реальные и виртуальные исследования неба», Армения, Ереван, 21-25 ноября 2011 г.,
- Международная научно – практическая конференции «Физика и динамика малых тел Солнечной системы», посвященная 80–летию Института астрофизики АН РТ, Душанбе 29 – 31 октября 2012 г.,
- 40th COSPAR Scientific Assembly 2014, Russia, Moscow, August 3-9, 2014,
- Международная конференция «Околоземная астрономия 2015», Россия, п. Терскол, Кабардино-Балкария, 31 августа – 5 сентября 2015 г.,

- Международная конференция «VI Бредихинские чтения», Россия, Заволжск, 4-8 сентября 2017 г.,
- Международная астрометрическая конференция «Пулково-2018», ГАО РАН, Россия, Санкт-Петербург, 1-5 октября 2018 г.,
- Meteoroids 2019, Bratislava, Slovakia, June 17 – 21, 2019,
- Международная научная конференция «Околоземная астрономия и космическое наследие 2019», Россия, Республики Татарстан, г. Казань, 30 сентября – 4 октября 2019 г.

Личный вклад автора

Автор в равной степени с другими соавторами участвовал в постановке задач, адаптации и внедрении программы Апекс-II, разработке методов наблюдений, определения параметров и их исследования, проведении вычислений, получении и представлении результатов и выводов.

В частности, лично автор:

1. Участвовал во всех наблюдениях и весь наблюдательный материал, использованный в диссертации, был получен при личном участии автора.
2. Усовершенствовал астрометрическую обработку, им был изучен, адаптирован и внедрен программный пакет АПЕКС II для обработки изображений.
3. Разработал оригинальную методику измерения скорости разлета фрагментов по изображениям кометы.
4. Выполнил обработку наблюдательного материала, измерил изображения, вычислил координаты, орбиты и физические параметры объектов.
5. Исследовал динамические и физические свойства избранных комет и астероидов.

Обсуждение полученных результатов проводилось совместно с научным руководителем Г.И. Кохировой и научным консультантом Х.И. Ибадиновым, а также с остальными соавторами. Публикации и доклады на конференциях были подготовлены или самостоятельно или в равных долях с другими соавторами. В вычислениях, анализе и интерпретации результатов автору принадлежит равный с соавторами вклад.

Список публикаций по теме диссертации включает 12 работ в научных изданиях, 4 из которых входят в Перечень ВАК, в том числе 2 журнала индексируемых в Web of Science и Scopus.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 168 работ. Общий объем диссертации 162 страницы, в том числе 29 рисунков и 58 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 текущее состояние проблемы изучения комет и астероидов, и методы обработки оптических наблюдений комет и астероидов. В §1.1 приведены имеющиеся результаты наблюдений комет и астероидов и задачи, которые еще не решены. В §1.2 дано краткое описание метода астрометрической обработки оптических наблюдений комет и астероидов, а также имеющиеся программные пакеты астрометрической обработки, рассмотрены общности и различия в обработке изображений комет и астероидов. Приведены методы определения координат и вычисления орбит объектов. В §1.3 дано краткое описание метода фотометрической обработки

изображений комет и астероидов, определения звездных величин и других физических свойств объектов. В §1.4 приведены результаты анализа точности астрометрии с помощью двух известных программных пакетов. После восстановления и модернизации телескопа Цейсс-1000 в Международной астрономической обсерватории Санглох ИА АН РТ в 2016 г. появилась возможность его использования в наблюдениях околоземных объектов наряду с телескопом АЗТ-8 Гиссарской астрономической обсерватории. Хотя результаты астрометрии с использованием двух программ свидетельствуют об их приемлемой точности и соответствии критериям астрометрии, принятых в международных базах данных, программный пакет АПЕКС II [9], впервые внедренный для обработки изображений в ИА АН РТ, обеспечил лучшую точность получаемых положений объектов. Глава 1 завершается выводами исследования в данном разделе.

Во второй главе приведены результаты наблюдений короткопериодических комет. В §2.1 приведены результаты наблюдений кометы 17P/Холмса в октябре-ноябре 2007 г., в этот период были зарегистрированы одновременно вспышка яркости кометы и деление ее ядра. Определен момент фрагментации ядра кометы $24^{\text{d}}.1 \pm 1.1$ октября 2007 г. (UT), по данным [12] $24^{\text{d}}.3 \pm 1.2$ октября 2007 г. (UT). Получена оценка скорости разлета фрагментов ядра $v = 107 \pm 35$ м/с, которая согласуется с оценками по другим наблюдениям: $v = 135 \pm 1$ м/с [10], $v = 132 \pm 4$ м/с [11], $v = 125 \pm 53$ м/с [12]. Известно, что, как правило, нормальное разделение ядра сопровождается скоростью разлета фрагментов порядка нескольких м/с [16,17]. В качестве причин разделения ядра кометы предложены несколько механизмов, в которых учитываются приливные, термические и вращательные силы, и показано, что даже с учетом этих сил, скорость разлета фрагментов не превышает нескольких десятков м/с [18]. В работе [19] показано, что скорость разлета осколков в результате вращательной дезинтеграции ядра составляет в среднем 0.5 м/с.

Скорость разлета фрагментов кометы 17P оказалась на два порядка выше рассмотренных оценок. Принимая во внимание имеющиеся пределы скоростей и гелиоцентрическое расстояние кометы 2.5 а.е. на момент наблюдений, что соответствует положению Главного пояса астероидов, сделано предположение, что с очень высокой вероятностью, причиной деления ядра кометы 17P/Холмса является столкновение с небольшим астероидным телом или крупным метеороидом. Вычислена орбита кометы после деления ядра и показано, что она сохранила стабильность, следовательно, столкновение не было катастрофичным, и не привело к изменению элементов орбиты.

В §2.2 рассмотрены результаты квазисинхронных наблюдений кометы 41P/Туттля - Джакобини - Кресака в МАОС и ГисАО. Анализ астрометрических измерений показывает достаточно хорошую точность определения координат по наблюдениям как в МАОС, так и в ГисАО, при этом данные двух телескопов хорошо согласуются между собой. Об этом свидетельствуют и элементы орбит, вычисленные по трем разным наблюдениям и различающиеся в пределах ошибок измерений. Многоцветные наблюдения в ГисАО позволили определить звездные величины кометы в широкополосных фильтрах *BVRI* (стандартная фотометрическая система Джонсона-Козинса) и построить кривые блеска. Найден абсолютный блеск кометы, который практически не изменялся в период наблюдений [20]. Поскольку комета наблюдалась в период сближения с Землей на минимальном расстоянии и вблизи перигелия, и, следовательно, находилась в активной фазе, нам удалось оценить фотометрический диаметр ядра кометы. Размер ядра, найденный из наблюдений, отличается от имеющейся оценки [21], следовательно, может быть рассмотрен как фотометрический диаметр, либо существующая оценка является устаревшей и размер ядра нуждается в дальнейшем уточнении. Найденные нами показатели цвета кометы соответствуют средним значениям активных комет семейства Юпитера.

В §2.3 приведены результаты наблюдений кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 в МАОС в период вспышечной активности в 2017 году. Комета включена в группу кентавров, объектов имеющих двойственные свойства, и периодически проявляет активность на больших гелиоцентрических расстояниях. Определены экваториальные координаты кометы, оценена точность астрометрических измерений для каждой координаты и вычислена орбита кометы на момент наблюдений, элементы которой соответствуют орбите MPC и свидетельствуют о стабильности движения 29P/Швассмана-Вахмана 1 на момент наблюдений. Определены видимые и абсолютные звёздные величины в фильтрах *BVRI*, построены кривые блеска и показано, что в период мониторинга комета проявила вспышечную активность, но абсолютная звездная величина кометы постепенно ослаблялась в конце наблюдений. Показатели цвета кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 по наблюдениям в МАОС хорошо согласуются со средними показателями цвета активных объектов группы кентавров и объектов пояса Койпера [22-25]. Выявлен сдвиг максимума излучения в красную часть спектра, что предполагает преобладающий вклад пылевых частиц в образование комы. Получены оценки размера ядра, причем удалось измерить эффективный диаметр ядра. Для 29P/Швассмана-Вахмана 1 величина геометрического альбедо достоверно не установлена, в литературе имеются два предположительных значения альбедо $A=0.13$ и $A=0.033$ и, соответственно, две оценки размера $D=40$ км и $D=104$ км [21, 26-28]. Согласно базе данных [28] для 29P/Швассмана-Вахмана 1 $A=0.033$ и $D=64$ км. Оценки диаметра получены нами с использованием обеих величин альбедо и вполне соответствуют имеющимся данным, однако альбедо и размер ядра нуждаются в уточнении.

В §2.3.3 исследована морфология комы кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 и выявлены две пылевые структуры в ней. Наши наблюдения и, как результат, выявленная морфология комы кометы 29P, вновь подтверждают способность таких объектов проявлять активность на сравнительно больших

гелиоцентрических расстояниях. Рассмотрен возможный механизм такой активности [25] и показано, что с высокой вероятностью причина вспышки связана с интенсивным выбросом нейтрального газа СО с поверхности ядра. Газ может высвобождаться в результате кристаллизации аморфного льда на поверхности ядра. Интенсивный выброс нейтрального СО был зарегистрирован наблюдениями кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 в субмиллиметровом диапазоне [29]. Увеличение газопроизводительности влечет за собой усиление пылеобразования, что приводит к резкому увеличению блеска объекта, т.е. к вспышке. Глава 2 завершается выводами исследования в данном разделе.

Третья глава посвящена исследованию динамических и физических свойств астероидов, сближающихся с Землей и классифицированных как потенциально опасные объекты. В §3.1 приведена методика определения прямоугольных гелиоцентрических координат объекта по его синхронным наблюдениям в двух обсерваториях с известными координатами. Приведены результаты квазисинхронных наблюдений астероида 2014 JO25 пятью обсерваториями РАН и двумя обсерваториями ИА АН РТ - МАОС (193) и ГисАО (190). Определены координаты объекта и средняя точность астрометрических наблюдений в разных обсерваториях. Вычислена первоначальная орбита астероида на основе комбинации наблюдений различных обсерваторий и показано, что лучший результат получен из квазисинхронных наблюдений астероида 2014 JO25 в обсерватории С20 (Горная астрономическая станция ГАО РАН, Кисловодск) и С15 (Уссурийская астрофизическая обсерватория ДВО РАН).

Сделан вывод, что при имеющейся точности астрометрических наблюдений для построения орбиты параллактический угол должен составлять не менее 10 угловых минут, а продолжительность совместных наблюдения двух обсерваторий должна быть не менее одного часа. В §3.1.1-3.1.2 исследованы динамические особенности астероида по наблюдениям в обсерваториях ИА АН

РТ. Определены координаты и точности их определений в двух обсерваториях. Первоначальная орбита вычислена отдельно по данным ГисАО и МАОС. Затем первоначальные орбиты были улучшены модифицированным методом Хергета в ПП ЭПОС [30]. Показано, что в данном мониторинге наблюдения ГисАО имели большую точность по сравнению с обсерваторией Санглох. Общий результат достаточно хорошо соответствует орбите MPC, которая была получена без использования указанных данных.

В §3.1.3 приведены результаты фотометрической обработки и определения физических свойств астероида 2014 JO25. Найдены видимые и абсолютные звёздные величины астероида в системе *BVRI* и построены кривые блеска. Показано, что видимые звездные величины за весь период наблюдений постепенно снижались, что объясняется тем, что астероид удалялся и от Солнца и от наблюдателя, но абсолютные звездные величины с учетом ошибок измерений варьировали вблизи эфемеридного значения. Определены показатели цвета и с использованием таксономической классификации астероидов по Д.Толену сделано предположение о принадлежности астероида 2014 JO25 к классам G, V или Q.

Получены оценки эффективного диаметра по данным наблюдений в МАОС и ГисАО, когда астероид наблюдался на практически одинаковых фазовых углах, величины диаметра - почти 1 км согласуются между собой, и весьма близки к оценкам, имеющимся в литературе. По нашим наблюдениям определен период вращения астероида равный 5.5 ч., что также очень близко к имеющимся оценкам периода.

В §3.2 приведены результаты квазисинхронных наблюдений потенциально опасного астероида (418094) 2007 WV4, выполненных несколькими обсерваториями РАН, а также в МАОС и ГисАО в период его сближения с Землей на минимальном расстоянии. Видимая скорость движения астероида в момент наибольшего сближения с Землей достигала сотен угловых

секунд в минуту, и это сильно затруднило как наблюдения, так и обработку. Кроме того, промежуток времени общих наблюдений в силу разных обстоятельств был очень короткий – около получаса и поэтому вычислить орбиту достаточной точности по квазисинхронным наблюдениям не удалось. Были определены координаты и построена небесная траектория. В §3.2.1 даны результаты астрометрической обработки отдельно наблюдений в ГисАО, определены координаты астероида и оценена точность астрометрии, позволившая вычислить орбиту, результат находится в хорошем соответствии с орбитой MPC.

В §3.2.2 приведены результаты фотометрической обработки изображений астероида, измерены видимые и абсолютные звёздные величины в фильтре R , а также оценен его размер. Показано, что в период наблюдений абсолютные звёздные величины астероида были близки к эфемеридному значению, и их величина практически не изменялась; оценка диаметра, вычисленная с величиной геометрического альбедо 0.045 [31] и приведенная в табл. 9, вполне согласуется с имеющимися данными 0.85 км [32] - 0.9 км [33]. Глава 3 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. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ КОМЕТ И АСТЕРОИДОВ

1.1. Оптические наблюдения комет и астероидов

Астрономические наблюдения являются основным методом исследования небесных объектов и явлений. Наблюдения могут вестись невооруженным глазом или с помощью оптических инструментов: телескопов, снабженных теми или иными приемниками – ПЗС–камерами, спектрографами, фотометрами, поляриметрами и т.п. Для наблюдений также применяются радиолокационные средства и аппаратура. В последние годы активно развиваются наблюдения с помощью космических миссий и телескопов, размещенных на космических станциях. Цели и объекты наблюдений весьма разнообразны, они определяются научными задачами и соответствующим оборудованием. В частности, для определения точных положений небесных объектов и вычисления орбит проводятся астрометрические наблюдения, тогда как для определения блеска и физических характеристик выполняются фотометрические, включая спектральные и поляриметрические наблюдения. Для получения и динамических, и физических особенностей необходимы комплексные наблюдения.

Внедрение новой технологии в астрономические наблюдения и переход от фотопленок и фотопластинок к ПЗС-приемникам в конце прошлого века кардинально изменили уровень и качество наблюдений. Важнейшим преимуществом ПЗС-приемников является получение цифрового изображения участка звездного неба, что позволило осуществить отождествление объектов и компьютерную обработку изображений почти в реальном времени. Это привело к усовершенствованию методов наблюдений астероидов, комет и других объектов. Наблюдательные средства, состоящие из телескопа с ПЗС–камерой и

компьютеров с необходимым программным и информационным обеспечением, подключенных к интернету, позволяют выявить объекты и определить их экваториальные координаты по звездам опорного каталога. Появилась возможность быстрого отождествления выявленных объектов с каталожными объектами, имеющими известные орбиты. Для новых объектов из полученной серии наблюдений можно вычислить их первоначальные орбиты и найти положения для будущих наблюдений [7]. Также оперативно можно определить видимый блеск объекта. Таким образом, результаты получаются практически во время наблюдений.

Основным направлением научных исследований в Институте астрофизики Академии наук Республики Таджикистан являются малые тела Солнечной системы – кометы, астероиды, метеороиды. Выполнение астрономических исследований на высоком уровне невозможно без наблюдений. В настоящее время в ИА АН РТ ведутся наблюдения малых тел Солнечной системы в двух обсерваториях - Международной астрономической обсерватории Санглох (МАОС) и Гиссарской астрономической обсерватории (ГисАО). В МАОС имеется телескоп Цейсс-1000, рефлектор, снабженный ПЗС камерой, со следующими характеристиками: $D/F=1000$ мм/13 300 мм, CCD FLI Pro Line 09000, FOV 10'x10', масштаб 0.289 arcsec/pixel. Кроме того, в МАОС имеется также телескоп Цейсс-600. В ГисАО используется телескоп АЗТ-8, рефрактор, также снабженный ПЗС камерой, со следующими характеристиками: $D/F=700$ мм/2820 мм, CCD FLI Pro Line 16803, FOV 44'x44', масштаб 1.75 arcsec/pixel.

В последние десятилетия выполнены широкомасштабные наблюдения с целью изучения ядер комет и астероидов с использованием средних и больших наземных телескопов и космических телескопов, оснащенных ПЗС-детекторами, что привело к появлению большого количества новых данных. Большая часть наших знаний о кометных ядрах и астероидах была получена из этих наблюдений. Однако, практика показывает, что на многие

вышеприведенные вопросы исчерпывающих ответов пока не получено, и для получения новых дополнительных данных необходимы систематические продолжительные наблюдения этих объектов.

Объектами изучения являются кометы и астероиды. Комета – это сложное физическое явление, которое кратко можно описать с помощью нескольких понятий. Уиппл [34-36] разработал модель ядра кометы как конгломерата пылевых частиц, легкоплавких льдов и замерзших газов. Отношение содержания пыли к газу в кометных ядрах составляет примерно 1:3. Размеры кометных ядер, по оценке ученых, заключены в интервале от 1 до 100 км. Так как комета имеет, как правило, высоко эксцентричную орбиту, то при приближении к Солнцу температура поверхности ядра повышается, льды начинают нагреваться и испаряться, а потоки сублимирующих газов выносят в голову кометы и ее хвосты частицы пыли со скоростями не более 300 м/с [35, 37].

Астероиды – это плотные и прочные тела. По составу и свойствам их можно условно разделить на три группы: каменные, железокаменные и железные. Астероид является холодным телом, но он отражает солнечный свет, и поэтому мы можем наблюдать его в виде звездообразного объекта. Астероиды и кометы имеют различную отражательную способность, как правило, кометные ядра имеют очень низкое альбедо, обычно $\sim 4\%$ [38], астероиды, напротив, характеризуются высоким значением альбедо. Кометы и астероиды различаются не только внешним видом для наземного наблюдателя, по составу и структуре, включая отражательную способность, но и по динамическим особенностям. Для классификации типа орбит малых тел используются несколько критериев, среди которых наиболее широко применяется постоянная Тиссерана T_j [39]. Она позволяет провести динамическое разделение между кометами и астероидами и определяется по отношению к Юпитеру следующим выражением [40, 41]

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

где a , e , i – большая полуось, эксцентриситет и наклонение орбиты объекта, a_j – большая полуось орбиты Юпитера. Для комет значение T_j лежит в интервале от 2.08 до 3.12, и для астероидов имеет значения свыше 3.12 [40]. Таким образом, в настоящее время условной границей, разделяющей типично кометные и астероидальные орбиты, все еще принято считать значение постоянной Тиссерана $T_j=3.12$ [42].

В последние годы, развитие мощных наблюдательных средств привели к быстрому увеличению количества открываемых малых тел. И стало очевидным, что различие между кометами и астероидами не столь четкое, как ранее подразумевалось. Сегодня имеется достаточно наблюдательных данных, подтверждающих существование суб-группы малых тел,двигающихся по астероидальным орбитам, а именно, их орбиты находятся внутри орбиты Юпитера и постоянная Тиссерана для них $T_j > 3$. Но в тоже время эти объекты проявляют признаки атмосфер и активность, типичную для комет. Такие объекты расположены в Главном поясе астероидов и названы «кометами Главного пояса» (КГП) [43]. Несколько механизмов потери массы для 11 таких объектов были рассмотрены Jewitt [44], где они обозначены термином «активные астероиды», поскольку некоторые из этих тел не принадлежат Главному поясу астероидов [44-46]. В этой группе такие известные объекты, как (3200) Фаэтон, (2201) Олджато и 107P/Вилсон-Харрингтон [42].

Среди астероидов, сближающихся с Землей, имеется небольшая фракция т.н. «уснувших» или «угасших» комет, и проблемы, связанные с их изучением, существуют давно [47,48]. В первую очередь их исследование дает одну из немногих возможностей прямых определений физических характеристик кометных ядер. 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 [42, 49-51]. К настоящему моменту из наблюдений известны 17 КГП и активных астероидов [42,51]. Значение КГП в том, что они, по-видимому, образуют третий резервуар комет в Солнечной системе (после облака Оорта и пояса Койпера) [44-46]. Сравнение объектов из трех резервуаров позволяет изучить протопланетный диск Солнца в трех местах: кометы Главного пояса, расположенные на расстояниях около 3 а.е. с температурой формирования около 150 К [52], кометное облако Оорта, сформированное на расстояниях от 5 до 30 а.е. при температурах от 100 до 50 К и кометы пояса Койпера, сформированные на расстояниях более 30 а.е. при температуре <50 К [22]. В связи с этим определение динамических и физических характеристик КГП, 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. В этом контексте наблюдения комет, астероидов, объектов перечисленных суб-групп, обработка наблюдательных данных и определение динамических и физических свойств этих тел были и остаются одной из важнейших задач в проблеме малых тел Солнечной системы. В результате получают новые данные и уточняются уже имеющиеся сведения об объектах, которые позволяют делать заключения и выводы об их динамической эволюции, природе, происхождении и генетической взаимосвязи, что, в конечном итоге, может обеспечить нас сведениями об условиях формирования Солнечной системы.

Динамические аргументы подтверждают гипотезу о том, что кометные ядра происходят как минимум из двух разных областей Солнечной системы. Считается, что подавляющее большинство эклиптических комет являются

фрагментами, образовавшимся в результате столкновений объектов пояса Койпера, это так называемые транснептуновые объекты [53-54]. В то время как большая часть долгопериодических комет и комет типа Галлея, весьма вероятно, образовалась вблизи больших планет, а затем была выброшена в облако Оорта [55], хотя источник комет типа Галлея определенно не установлен [56-57]. Из-за различного происхождения возникает вопрос: имеют ли две кометные популяции разные физические свойства, или они отражают непрерывный спектр планетазималей в ранней Солнечной системе, что делает их больше похожими, чем разными. Ядра комет первой группы подвергаются значительному нагреву во время частых прохождений через внутреннюю Солнечную систему, в результате, процессы сублимации разрушают поверхностные слои и внутреннее пространство, что, возможно, приводит к изменению формы и структуры ядра. Weissman [58] показал, что почти 10% комет второй популяции делятся при первом прохождении через перигелий, и Levison et al. [59] предположили, что 99% из них в конечном итоге разрушатся в ходе динамического развития. Это также может указывать на различные физические свойства для комет этих популяций, хотя убедительных прямых доказательств таких различий пока не найдено [21].

Таким образом, существует множество процессов, связанных с образованием и эволюцией комет, которые могут влиять на физические свойства ядер комет. Даже если бы существовал общий механизм формирования всех кометных ядер, разнообразие могло бы сохраняться из-за различий в физических и химических условиях на разных гелиоцентрических расстояниях. Поэтому не следует ожидать, что кометы образуют однородную группу по своим физическим свойствам, и существует необходимость исследовать возможные корреляции этих свойств с местом происхождения кометы и ее последующей историей, а также сравнение этих свойств с кометами других подгрупп. С этим связана одна из целей данного исследования.

Исследование условий деления ядра короткопериодической кометы на примере кометы 17P/Холмса является еще одной целью данной работы. Нестационарная активность комет, т.е. активность не связанная с прохождением перигелия, проявляется в виде вспышек их яркости, газо-пылевых струй (джетов), галосов и оболочек в голове кометы, плазменных неоднородностей и синхронных образований в хвостах. Наиболее катастрофичным проявлением нестационарной активности кометы является деление, а иногда и разрушение ядра. Причинами могут быть приливные силы Солнца и планет, столкновение ядра с другим телом, активные процессы в самом ядре или особенности его структуры, вращение и дезинтеграции ядра. Исследования деления ядра кометы [16, 60-67] показывают, что точно зарегистрировать момент деления ядра очень трудно. Это происходит, в первую очередь из-за того, что кометное ядро, как правило, имеет небольшие размеры (1-10 км), более того, оно окружено газопылевым облаком, и поэтому своевременно зарегистрировать момент его деления по наземным наблюдениям не удастся. Это обычно обнаруживается после разлета фрагментов ядра на достаточно большие расстояния. В настоящей работе на основе оптических наблюдений деления ядра кометы 17P Холмса и обработки материала изучены условия деления ядра и получены качественные оценки скорости разлета фрагментов ядра, позволяющие сделать заключение о причинах этого явления.

Основная цель наблюдений комет состоит в том, чтобы изучить свойства их ядер, выяснить имеется ли общность в их свойствах и в чем состоит различие. Наиболее распространенный метод наблюдений включает фотометрию на видимой длине волны, из которой можно измерить блеск, цвет, эффективный диаметр и альбедо. Длительные временные ряды наблюдений на этих длинах волн дают представление о форме и состоянии вращения ядра. Астрометрия кометных наблюдений обеспечивает данные по динамическим

особенностям комет, включая орбитальные элементы, что позволяет судить о стабильности орбиты или ее изменениям.

Основные цели оптических наземных наблюдений астероидов связаны с определением точных положений и орбит, диаметров и геометрической формы (возможное бинарное или множественное строение объекта, наличие спутника), структуры и состава поверхности, периода и ориентации оси вращения и других параметров. Задачи, связанные с мониторингом астероидов, включают астрометрию и фотометрию наблюдательного материала с целью определения или уточнения динамических и физических свойств объектов. Здесь нахождению точных положений астероидов и вычислению их орбит придается особое значение. Чем больше измерено положений астероида на больших временных интервалах, тем точнее вычисляется его орбита. Банк данных элементов орбит является наиважнейшим набором данных наземных наблюдений астероидов, поскольку именно на его основе идентифицируются известные астероиды, определяются расстояния до них и фазовые углы на момент наблюдений. К настоящему моменту открыто более 21951 астероидов, сближающихся с Землей, сведения о которых содержатся в базах данных [см., например, 28, 68]. В отдельную группу отобраны потенциально опасные астероиды, имеющие тесные сближения с Землей.

Другим значительным набором данных наземных наблюдений являются сведения об абсолютном блеске астероидов, что необходимо для оценки диаметров. По этим данным можно вычислить световой поток в видимом диапазоне, отраженный поверхностью астероида и с использованием данных об этом потоке, измеренных в инфракрасном диапазоне, определить альбедо. Показатели цвета также играют важную роль, так как по ним и используя таксономическую классификацию астероидов [69] можно предположить минералогический состав тела. Кроме этого, показатели цвета необходимы для конвертирования абсолютного блеска из одной полосы в другую и вычисления

модельных значений диаметра и альбедо. Благодаря значительным наблюдательным усилиям, предпринятым в последние десятилетия, включая такие наблюдательные средства, как *UBVRI*-фотометрия, инфракрасная радиометрия и поляриметрия, стали известны приблизительные диаметры и альбедо значительного количества астероидов. Наблюдаемые кривые блеска являются носителями ценнейшей информации о физических свойствах астероидов – геометрической фигуре, ориентации, микро- и макроморфологии поверхности, изменений альбедо и пр. На их основе для многих астероидов определен период вращения, изменяющийся в пределах от нескольких часов до нескольких дней и больше данных см., например базу данных DAMIT, ALCDEF [70]. Разработаны алгоритмы и программные комплексы, позволяющие на основе кривых блеска методом инверсии кривой блеска [71,72] моделировать трехмерные геометрические фигуры астероидов. Метод позволяет определить сидеральный период вращения и координаты полюсов, и таким образом, построить детальную 3D модель фигуры астероида.

Имеющиеся кривые блеска свидетельствуют о том, что астероиды имеют сложную структуру поверхности. На поверхности астероидов, несомненно, имеются многочисленные кратеры и трещины, она может затеняться возвышенностями, напоминающими горные гряды, эти особенности отображаются на кривых блеска в виде нескольких экстремумов. Приведенные сведения позволяют заключить, что оптические наблюдения околоземных астероидов, в особенности потенциально опасных, сохраняют свою актуальность и значимость для изучения их динамических и физических свойств.

1.2. Методика астрометрической обработки изображений, определение координат и элементов орбит объектов

Итак, в настоящее время основным средством получения первоначальной информации о космическом объекте являются ПЗС-наблюдения. Впервые ПЗС-приемники были применены в наблюдениях для поиска астероидов и их астрометрии на 91 см телескопе Spacewatch обсерватории Стюарда Аризонского университета в США [73]. Результаты этой группы наблюдателей, начиная с 1984 года, регулярно публикуются в электронных циркулярах IAU Minor Planet Center. Разработанные ими методы и результаты, полученные в новой области наблюдательной астрономии, способствовали распространению и использованию ПЗС-технологии наблюдателями астероидов и комет. Астрометрическая обработка изображений и вычисление экваториальных координат объектов в ПЗС-кадре производится методами, принятыми в фотографической астрометрии [74].

Основными задачами астрометрии являются измерения положений небесных объектов из данных их наблюдений.

Согласно известным методам классической фотографической астрометрии экваториальные координаты объектов на кадрах определяются следующими уравнениями связи [75, 76]:

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

Уравнения (1.2) связывают измеренные на негативе прямоугольные координаты x, y и тангенциальные координаты ξ, η , являющиеся функциями экваториальных координат α, δ , и учитывают детальные свойства снимка, а также метод определения координат. Для определения положения одиночного объекта в центре кадра или нескольких объектов в малом поле зрения (до 2°) достаточную

точность обеспечивают линейные члены уравнений связи (метод шести постоянных или метод Тернера) [7]:

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

где $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2$ –коэффициенты необходимые для преобразования измеренных на кадре прямоугольных координат x, y в экваториальные α, δ . 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 [75,76]

$$\xi = \frac{\cos\delta \sin\alpha - \alpha_0}{\sin\delta_0 \sin\delta - \sin\delta_0 \cos\delta(\alpha - \alpha_0)}\tag{1.4}$$

$$\eta = \frac{\cos\delta \sin\delta - \sin\delta_0 - \cos\delta \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin\delta_0 \sin\delta - \sin\delta_0 - \cos\delta \cos(\alpha - \alpha_0)}\tag{1.5}$$

где (α_0, δ_0) – координаты центра поля зрения кометы,

(α, δ) – экваториальные координаты опорной звезды

Точность положений объектов в новой системе зависит от метода получения координат и от точности использованного каталога.

Отметим, что соответствие прямоугольных координат экваториальным координатам определяется свойствами оптики телескопа и ПЗС-камеры и эта связь находится экспериментально для каждого отдельных сеансов наблюдений.

Для обработки астрометрических наблюдений комет и астероидов существует несколько программных пакетов. Приведем краткое описание программ, используемых для астрометрической обработки наблюдений, приведенных в диссертации.

Программный пакет Astrometrica хорошо известен профессионалам и любителям астрономии, занимающихся позиционными ПЗС-измерениями объектов Солнечной системы [77,78]. Результаты астрометрической обработки изображений объектов, выполненные с использованием ПП Astrometrica апробированы и широко используются, а также совместимы с данными обработки по другим программам. ПП Astrometrica поддерживает 5 локальных каталогов звезд и 2 каталога из Интернет-ресурсов [77,78]. Первоначально в автоматическом режиме выбирается от 500 до 700 звезд, затем по координатам в каталогах выполняется их поиск, в результате, как правило, остается до 150 отождествленных звезд. Затем выполняется астрометрическая редукция кадра. Для учета искажений изображения, которые производит оптическая система, применяются методы шести или восьми постоянных. С их помощью и по небольшим отличиям расстояний между изображениями от расстояний между звёздами (которые определяются по каталожным координатам) строится модель кадра, учитывающая искажения. Пиксельные координаты центров изображений объектов вносятся в уравнения этой модели и вычисляются экваториальные координаты объектов (в системе использованного каталога) [78,78].

Определение функции рассеяния (point spread function - PSF) точки в кадре осуществляется по профилю изображения, описываемого кривой Гаусса или её модификациями. Для учета возможных различий формы изображения в разных направлениях используется двумерная функция с разными значениями параметров по разным осям. Такая функция подбирается для нескольких звёзд на кадре, изображения которых удалось измерить хорошо. Затем параметры этих функций усредняются, и получается средняя PSF для кадра. Эта функция применяется с масштабированием для описания всех звёздных изображений на кадре и изображений объектов. Пиксельные координаты вершины PSF-функции считаются центром изображений. Затем выполняется отождествление кадра со звёздным каталогом. По экваториальным координатам звёзд в области каталога,

соответствующей координатам центра кадра, ищутся конфигурации аналогичные конфигурациям центров изображений, определённых на кадре. Таким образом, каждому изображению ставится в соответствие звезда из опорного каталога. В процессе астрометрической обработки на экран выводятся ПЗС-кадры, по опорным каталогам визуализируется соответствующая область звездного неба, звезды на кадрах отождествляются в каталогах, выполняются позиционные и фотометрические измерения объектов на кадрах. Для отождествления опорных звезд используются каталоги HIPPARCOS, TYCHO-2, USNO-A2.0, USNO-B1.0, UCAC3, UCAC4, UCAC5. Астрометрическая редукция основана на решении классического уравнения (1.3) методом шести постоянных. ПП Astrometrica позволяет проводить обработку наблюдений с выдачей результатов в формате, принятом в электронных циркулярах IAU Minor Planet Center [77,78].

Программные пакеты АПЕКС-I и АПЕКС-II были созданы для астрометрической и фотометрической обработки астрономических наблюдений, получаемых с помощью ПЗС-камер [9]. ПП АПЕКС-I используется для полуавтоматической обработки, пакет АПЕКС-II позволяет проводить полностью автоматическую обработку, включающую калибровку ПЗС-изображений, детектирование объектов, измерение объектов, астрометрическая обработка, фотометрическая обработка.

Для выполнения астрометрической редукции в ПП АПЕКС-II, 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 [9]. Затем по наборам x , y координат опорных звезд каталога и их измеренных координат на кадре проводится определение параметров модели

редукции. В основном пакете АПЕКС-II имеются стандартные линейные и нелинейные модели редукции - модели 6, 8 и 10 постоянных и другие модели [9]. К примеру, модель 8 постоянных в АПЕКС-II определяет в своей исходной формулировке связь между координатами звезд по каталогу и измеренные их координаты на кадре [76]. Определенные методом наименьших квадратов параметры модели применяются затем к измеряемым объектам, и осуществляется обратное преобразование для получения координат объектов в системе опорного каталога [9].

Как отмечалось, 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-B1.0, UCAC2, UCAC3, UCAC4, UCAC5, 2MASS и APASS (AAVSO Photometric All-Sky Survey). [79-81].

Точность наблюдений и их астрометрической обработки можно контролировать с использованием модуля программной системы ЭПОС [30] и Find_orb [82].

Используя измеренные координаты комет и 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 [6, 7].

Приведенные программные пакеты позволяют также вычислять орбиты объектов по положениям, найденным в результате астрометрической обработки наблюдений.

Методы вычисления элементов орбиты небесного тела по небольшому числу наблюдений основаны на предположении, что движение этого объекта является невозмущенным кеплеровским - эллиптическим, гиперболическим или

параболическим. Методы применяются для определения предварительной орбиты, например, астероида или кометы используются в теоретическом анализе движения естественных или искусственных небесных тел [6, 7].

Find_Orb - программа, которая обрабатывает начальное определение орбиты с использованием методов Гаусса, Херга, Вайсяля и других [82]. Учитывая некоторые дополнительные наблюдения, он может найти «наилучшую подходящую» орбиту, используя метод наименьших квадратов.

ЭПОС (Эфемеридная программа для объектов Солнечной системы) является эффективным инструментом для исследования и эфемеридной поддержки наблюдений объектов Солнечной системы, в том числе и ОСЗ [30]. Программная система (ПС) ЭПОС включает ряд компонентов, такие как «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 т. д.; «Эфемериды», эта подпрограмма вычисляет самые разнообразные по типу и точности эфемериды для наблюдений объектов Солнечной системы, а также для задач моделирования их движения; «О-С»: Сравнение наблюдений и вычислений», здесь сравниваются наблюденные и вычисленные положения и скорости объектов и др. [30].

Методы улучшения орбит преследуют цель уточнения элементов предварительной невозмущенной орбиты по большому числу наблюдений или определения по этим наблюдениям более точных элементов оскулирующей орбиты небесного тела, отнесенной к тому или иному моменту времени. Подробное изложение методов определения орбит дано в работах [83-86]. Обзор методов содержится в [87].

1.3. Методика фотометрической обработки, определение звездных величин и других физических параметров объектов

Основной задачей фотометрической обработки является определение звездных величин объекта и выявление их изменений. Предельная звездная величина регистрируемых объектов зависит от эффективного диаметра телескопа D , квантовой эффективности приемника Q , размеров изображения звезды на матрице Δ , времени накопления t , принятого значения отношения сигнала к шуму s/n , а также от яркости фона неба μ [88]:

$$m_{\min} = \mu + 2.5k \cdot \lg \frac{D\sqrt{Qt}}{(s/n)\Delta} \quad (1.6)$$

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 пакете АПЕКС-II реализован алгоритм дифференциальной фотометрической редукции с привязкой к опорному каталогу [9]. Для этого, прежде всего, осуществляется автоматический выбор опорных звезд по различным критериям - прежде всего, по блеску, цвету, SNR и форме; исключаются также звезды в насыщении. Для приложений, требующих высокой фотометрической точности, возможно также явное указание опорных звезд вручную. 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 или оптимальный

поток (см. выше). Фотометрическая модель является полиномиальной моделью вида

$$m' = m_0 + k_1 m + k_2 m^2 + \dots [+ kM(z)], \quad (1.7)$$

где m — измеренная звездная величина звезды на кадре, m' - звездная величина звезды по каталогу, приведенная к инструментальной системе, $M(z)$ - воздушная масса, $m_0, k_1, \dots$ - 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 (1.7) 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 определяемых объектов для получения его блеска в системе каталога.

Переход от измеренного таким образом относительного блеска объекта в каком-либо фильтре к его абсолютному значению осуществляется по известным эмпирическим соотношениям, причем эти формулы различны для астероидов и комет. Известно, что блеск астероидов сильно зависит от фазового угла [см., например, 89-91]. Как правило, для астероидов звездные величины m конвертируются в абсолютные величины H по следующей полуэмпирической формуле, позволяющей более точно описать изменение блеска астероида в диапазоне фазовых углов от 0 до 120 град. [92]:

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

$$\Phi_i = \exp \left[-A_i \{ \tan(\beta / 2) \}^{B_i} \right] i = 1, 2, \quad (1.8)$$

где β – фазовый угол (ph) объекта, 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 работе [93].

В фотометрии комет относительный блеск m_a конвертируется в абсолютную яркость ядра кометы $m_a(1,1,0)$ с использованием следующего эмпирического уравнения [94,95]

$$m_a(1,1,0) = m_a - 5\log(r\Delta) - \beta\alpha, \quad (1.9)$$

здесь $m_a(1,1,0)$ (или H) – звездная величина 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. Когда точная величина фазового коэффициента объекта не известна, используется общепринятое значение $\beta=0.035$ зв.вел./град. [21].

Результаты фотометрической редукции наблюдений, а именно, найденный относительный и абсолютный блеск объектов для продолжительных временных рядов, крайне необходимы для определения важнейших физических характеристик малых тел. При этом методы и подходы нахождения физических свойств астероидов и комет в силу различий между ними, приведенных выше, различаются. Подробное описание методов определения эффективного диаметра ядер комет и астероидов приведено в Главах 2 и 3, там же приведен метод определения периода вращения объектов на основе полученных кривых блеска. Отметим лишь, что для комет точность измерения звездных величин ядра зависит от гелиоцентрического расстояния кометы, чем ближе комета к Солнцу, тем труднее измерить звездные величины 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.

Еще один важный параметр, который можно получить из наблюдений – это показатель цвета объекта (колор-индекс), который представляет собой разность между значениями абсолютного блеска в разных фильтрах. Эта величина сама по себе не дает много информации о физических свойствах ядер комет. Однако сравнение показателей цвета исследуемого объекта с другими объектами Солнечной системы – активными кометами семейства Юпитера (active JFC), активными долгопериодическими кометами (active LPC), объектами пояса Койпера (Kuiper belt objects) и др., или их возможная корреляция с другими параметрами (размером, элементами орбит и др.) могут иметь большое значение в определении происхождения и эволюции кометных ядер, а также их взаимосвязей. Основой в этом анализе служит хорошо известный результат - по спектральным характеристикам кометные ядра статистически более красные, чем Солнце [22]. Отметим, что в реальности их показатели цвета очень разнообразны и занимают области спектра от слегка синей до значительно красной [21].

Для астероидов показатели цвета играют более результативную роль. Благодаря имеющейся зависимости показателей цвета в системе *BVRI* с таксономической классификацией или спектральным классом астероидов, найденной [69], на основе полученных показателей цвета астероида вкупе с величиной альбедо появилась возможность сделать предположение об его минералогическом составе.

Если в фотометрии астероидов имеется определенный однозначный подход, то в изучении самого ядра кометы имеются трудности, так как кометы обычно активны в период прохождения перигелия и сближения с Землей, в это время световой поток, отражаемый комой, значительно превышает световой поток от ядра. Существуют несколько подходов, с помощью которых эта

трудность может быть преодолена на оптических длинах волн [94]. Во-первых, ядро можно увидеть в коме, с помощью космической миссии, находящейся на очень близком расстоянии от кометы. Этот подход был успешно осуществлен с помощью космических миссий, таких как миссии Вега-1, Вега-2 и Джотто к комете 1P/Галлея в 1986 г. [96-98], в результате которых развитая Уипплом [34,35] модель кометного ядра как «грязный снежный ком» получила экспериментальное подтверждение. Новые сведения о кометном ядре предоставили космические миссии Deep Space 1 к комете 19P/Борелли [99], Stardust к 81P/Вилд 2 [100] и Deep Impact к 9P/Темпель 1 [101]. Грандиозный проект космической миссии Розетта к комете 67P/Чурюмова-Герасименко также обеспечил научное сообщество беспрецедентной достоверной информацией о кометном ядре, а именно, форме, размерам, массе, плотности, альбедо, периоде вращения, температуре поверхности, составе льдов ядра, изотопном составе, свойствах магнитного поля, и другим характеристикам [98]. Посадочный модуль «Филы», находившийся на поверхности ядра кометы 67P/ Чурюмова - Герасименко выполнил анализ состава льдов ядра кометы. Вблизи поверхности ядра обнаружены молекулы воды (H_2O), угарного газа (CO), углекислого газа (CO_2), аммиака (NH_3), метана (CH_4), метанола (CH_3OH), формальдегида (CH_2O) и др. [98, 102-103]. Однако, хотя космические миссии предоставляют наиболее полную информацию о кометном ядре, они очень дорогие и ограничены в количестве целей, которые они могут наблюдать. Второй метод основан на наблюдениях с помощью и наземных мощных телескопов, и космического телескопа Хаббла в периоды очень близких подходов комет к Земле, когда на изображениях с очень высоким разрешением сигнал от ядра может быть отделен от сигнала окружающей комы см., например, [104]. Но этот метод из-за редкости сближений с Землей может быть применен только к ограниченному числу комет. Третий подход связан с получением изображения комет на больших гелиоцентрических расстояниях, когда они находятся в неактивной

стадии. Здесь основное внимание уделяется получению свойств ядер комет семейства Юпитера (JFC), которые представляют собой короткопериодические кометы, в орбитальной эволюции которых доминирует планета Юпитер. Считается, что кометы переброшены в эту область из пояса Койпера [105], а их ядра являются остатками материи, из которой сформировалась Солнечная система. Обнаружено, что JFC активны на гелиоцентрических расстояниях менее 3 а.е., где, действительно, скорость сублимации водяного льда (основной летучей составляющей ядер) резко возрастает. Сложности этого метода связаны с небольшими размерами ядер и их низким альбедо, тем не менее, и его реализация предоставляет обширнейший материал, на основе которого можно определить новые или уточнить уже имеющиеся физические свойства кометных ядер. В этом подходе для нахождения оценок геометрической формы, эффективного диаметра, объемной плотности, периода вращения кометного ядра используется фотометрия временных наблюдательных рядов [94]. Наблюдения «моментального снимка» дают эффективный радиус только на одной обычно неизвестной фазе вращения. Фотометрические данные временного ряда позволяют измерять истинный эффективный радиус.

1.4. Анализ точности результатов астрометрии с использованием различных программных комплексов

До 2016 г. астрометрическая обработка изображений объектов в Институте астрофизики АН РТ выполнялась с использованием ПП Astrometrica. После восстановления и модернизации телескопа Цейсс-1000 в 2016 г. наблюдения в Международной астрономической обсерватории Санглох значительно активизировались. Выполнен большой объем наблюдений астероидов, комет, объектов космического мусора. С получением нового наблюдательного материала возникла необходимость в усовершенствовании процесса астрометрической и фотометрической обработки и приведения результатов к современному профессиональному уровню. В этой связи была поставлена задача освоения и внедрения ПП АПЕКС-II в Институте астрофизики АН РТ для астрометрической и фотометрической обработки наблюдательных данных. При консультационной поддержке сотрудников ГАО РАН и ИНАСАН ПП АПЕКС-II размещен на ПК и адаптирован к нашим ресурсам. Для обработки наших наблюдений создана новая конфигурационная подпрограмма и в ПП АПЕКС-II внесены параметры наших телескопов. После тестирования новых настроек программа заработала и в настоящее время используется для обработки изображений объектов.

Как было отмечено, 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 этом параграфе приведены результаты оценки точности астрометрической обработки наблюдений, выполненной с использованием ПП АПЕКС-II и Astrometrica. Для астрометрии использованы наблюдения

астероида (596) Шейла, проведенные на телескопе Цейсс-1000 с ПЗС - камерой FLI Proline PL16803 в Международной астрономической обсерватории Санглох ИА АН РТ в июне и июле-августе 2017 г [106]. Рабочий масштаб изображений составил 0.36 угловых сек. на пиксель. Качество изображений, которое было измерено как среднее значение FWHM нескольких звезд с отдельных кадров, составило 2.1 угловых сек. Первичная обработка кадров выполнена по стандартной процедуре, учитывающей темновой сигнал, выравнивание полей изображений, ошибки матрицы ПЗС-камеры. За весь период наблюдений получено 550 кадров с экспозициями 10 и 60 сек. Для измерений изображений астероида и звезд поля использовалась апертура фиксированного радиуса, которая позволила охватить объект полностью.

Рассмотрим результаты астрометрической обработки наблюдений, выполненных с помощью ПП АПЕКС-II. 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" [107]. Для измерений положений на кадрах использовались опорные звезды с блеском, соответствующему указанному интервалу.

Зависимость отклонений экваториальных координат астероида измеренных по наблюдениям (O) от вычисленных данных (C), обозначенные как (O-C), от времени наблюдений 30 июля 2017 г. приведена на рис.1.1. В табл.1.1 представлены средние значения отклонений измеренных экваториальных координат (O) от вычисленных 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 трех ночей в обсерватории Санглох. Как видно, значения (O-C) позволяют адекватно судить о качестве полученных астрометрических данных. Средняя по всем кадрам ошибка

астрометрической редукции за весь период наблюдений не превышает 0.062" и 0.048" для прямого восхождения α и склонения δ соответственно.

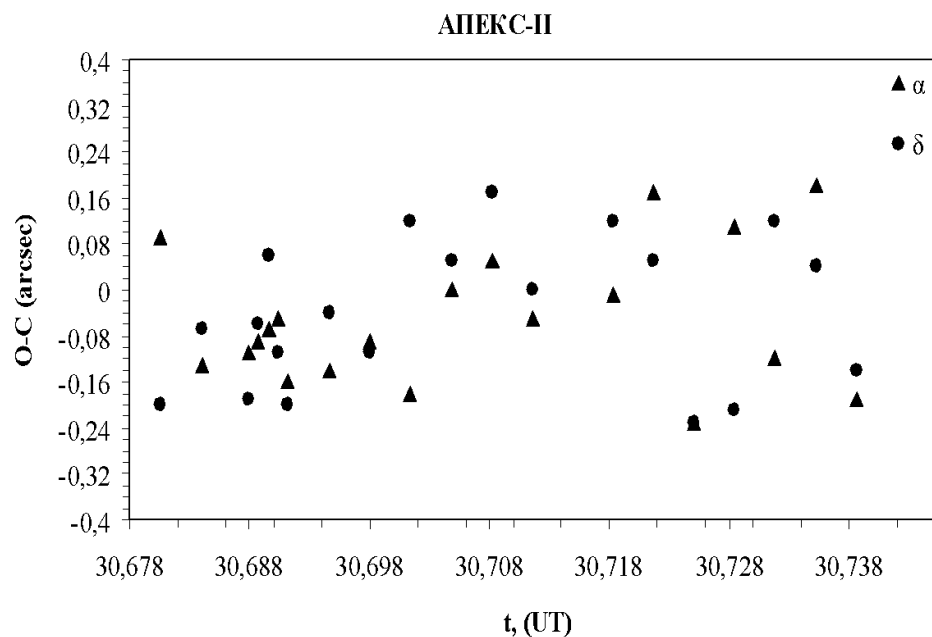


Рис.1.1. Зависимость отклонений (О-С) экваториальных координат астероида (596) Шейла от времени по наблюдениям в обсерватории Санглох.

Таблица 1.1. Астрометрическая точность положений астероида (596) Шейла (ПП АРЕХ-II)

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

Результаты определения координат астероида приведены в таблице 1.2, а также на рис.1.2, где по оси абсцисс даны α – прямое восхождение и по оси ординат δ – склонение астероида [108].

Таблица 1.2. Координаты астероида (596) Шейла по наблюдениям в
обсерватории Сангloch

№	Дата 2017 г.	Момент наблюдений (UT)	α	δ	m (зв.вел.)
1	30 июля	16 ^h 20 ^m 08 ^s .16	16 ^h 02 ^m 21 ^s .51	-25°53'12".1	12.8
2	30 июля	16 25 00.19	16 02 21.57	-25 53 12.9	12.8
3	30 июля	16 30 39.74	16 02 21.66	-25 53 14.1	12.8
4	30 июля	16 31 49.73	16 02 21.68	-25 53 14.2	12.8
5	30 июля	16 33 00.58	16 02 21.70	-25 53 14.3	12.8
6	30 июля	16 34 11.42	16 02 21.72	-25 53 14.7	12.8
7	30 июля	16 35 22.27	16 02 21.73	-25 53 15.1	12.8
8	30 июля	16 40 21.22	16 02 21.81	-25 53 15.8	12.8
9	30 июля	16 45 13.25	16 02 21.89	-25 53 16.8	12.9
10	30 июля	16 50 05.28	16 02 21.96	-25 53 17.5	12.9
11	31 июля	17 13 09.41	16 02 47.38	-25 58 01.9	13.1
12	31 июля	17 18 00.58	16 02 47.47	-25 58 02.9	13.1
13	31 июля	17 22 52.61	16 02 47.57	-25 58 03.7	13.1
14	31 июля	17 27 44.60	16 02 47.67	-25 58 04.5	13.1
15	31 июля	17 32 36.67	16 02 47.72	-25 58 05.7	13.2
16	31 июля	17 37 28.70	16 02 47.83	-25 58 06.4	13.1
17	31 июля	17 42 20.74	16 02 47.89	-25 58 07.5	13.1
18	31 июля	17 47 12.77	16 02 47.99	-25 58 08.3	13.1
19	31 июля	17 52 04.80	16 02 48.09	-25 58 08.9	13.2
20	31 июля	17 56 56.83	16 02 48.13	-25 58 10.3	13.3
21	01 августа	15 48 46.37	16 03 12.63	-26 02 25.9	13.2
22	01 августа	15 53 36.67	16 03 12.71	-26 02 26.8	13.2
23	01 августа	15 58 28.70	16 03 12.80	-26 02 27.6	13.1
24	01 августа	16 03 20.74	16 03 12.89	-26 02 28.6	12.9
25	01 августа	16 08 12.77	16 03 12.97	-26 02 29.7	13.1
26	01 августа	16 13 03.94	16 03 13.06	-26 02 30.6	13.2
27	01 августа	16 17 55.97	16 03 13.14	-26 02 31.4	13.1
28	01 августа	16 22 48.00	16 03 13.24	-26 02 32.3	13.2
29	01 августа	16 27 39.17	16 03 13.32	-26 02 33.3	13.0
30	01 августа	16 32 31.20	16 03 13.41	-26 02 34.2	13.0

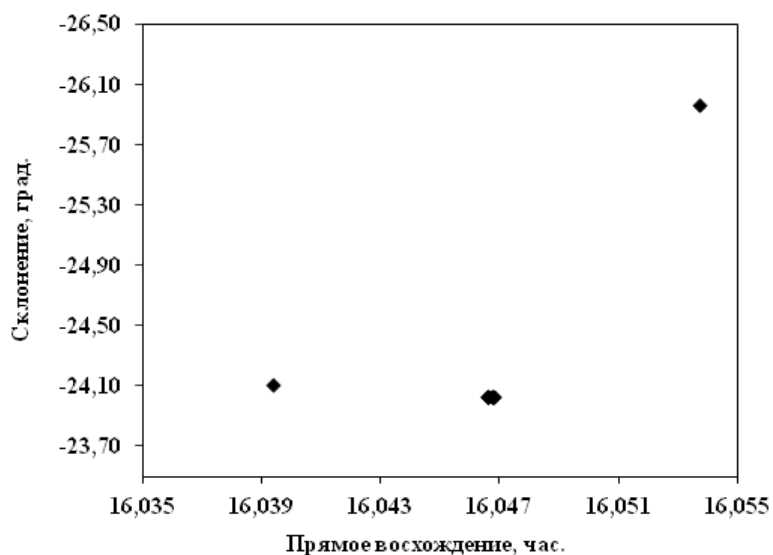


Рис.1.2. Видимая траектория астероида (596) Шейла по наблюдениям в обсерватории Санглох в 2017 г.

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. Для среднего момента наблюдений МАОС с использованием ПП ЭПОС [30] и 208 измеренных положений удалось получить первоначальную орбиту астероида, приведенную в табл.1.3. 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.1.3 приведена орбита, вычисленная на основе свыше 3700 наблюдений астероида в различных обсерваториях с 1906 по 2017 гг. согласно базе данных IAU MPC [109], в последнем столбце приведены величины разности между вычисленной нами орбитой и орбитой MPC, обозначенные как χ .

Таблица 1.3. Первоначальная орбита астероида (596) Шейла по наблюдениям обсерватории Санглох и орбита IAU MPC (J2000.0)

Элементы орбиты	МАОС	[109]	χ
Кол-во положений, использованное для вычисления орбиты	208	3758	-
T	JD 2458716.1	JD 2457892.4	-
$Эпоха$	2457979.5	2458000.5	-
e	0.163544 ± 0.00047	0.163481	-0.000060
a , а.е.	2.928212 ± 0.000013	2.927613	-0.000600
q , а.е.	2.449321 ± 0.00014	2.448981	-0.000340
i , град.	14.660232 ± 0.00047	14.661491	0.001260
ω , град.	70.603871 ± 0.00045	70.606315	0.002440
Ω , град.	175.277392 ± 0.0018	175.156694	-0.120700
n , град./сут.	0.196704 ± 0.00017	0.196762	0.000060
σ	0".462	0".356	-

Приведем результаты астрометрической обработки наблюдений астероида Шейла с использованием ПП Astrometrica. В обработке использованы опорные звёзды с блеском в диапазоне от 10.2^m до 15.8^m . Координаты таких звезд приведены в каталоге со средней астрометрической точностью 0.02". Рассмотрим полученные результаты и сравним показатели точности результатов астрометрии астероида по двум программным пакетам.

Зависимость значений (О-С) от времени наблюдений 30 июля 2017 г. приведена на рис.1.3 и в табл.1.4 представлены средние значения $(O-C)_\alpha$ и $(O-C)_\delta$ со средними квадратичными ошибками σ_α и σ_δ по наблюдениям трех ночей. Как видно, средняя по всем кадрам ошибка астрометрической редукции за весь период наблюдений не превышает 0.068" и 0.046" для α и δ соответственно, что несколько ниже точности, полученной с помощью ПП АПЕКС-II. График (О-С), совмещающий результаты точности двух программ, приведен на рис. 1.4.

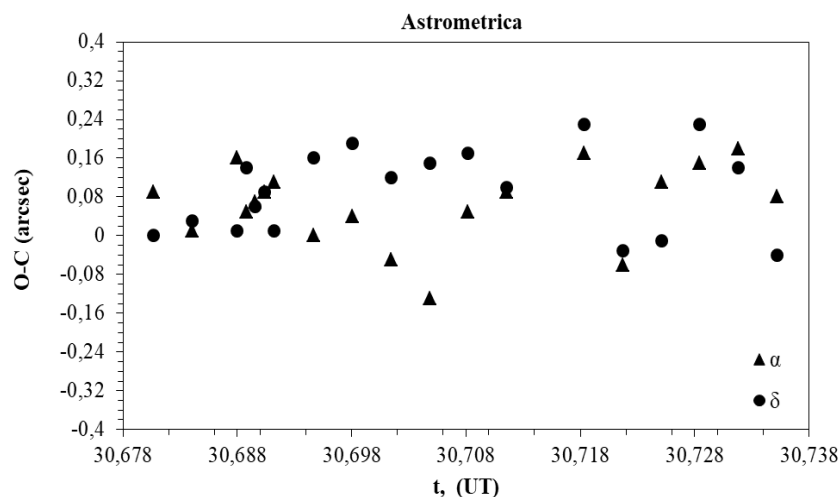


Рис.1.3. Зависимость отклонений (O-C) экваториальных координат астероида (596) Шейла от времени по наблюдениям в обсерватории Санглож.

Таблица 1.4. Астрометрическая точность положений астероида (596) Шейла (ПП Astrometrica)

Дата	$(O-C)_\alpha$	σ_α	$(O-C)_\delta$	α_δ
30.07.2017	-0.056"	0.029"	-0.046"	0.030"
31.07.2017	-0.118	0.068	-0.050	0.046
01.08. 2017	-0.042	0.018	-0.043	0.027

В табл. 1.5 приведены экваториальные координаты астероида, вычисленные по двум программам для каждого кадра одной ночи наблюдений 30 июля 2017 г., а также разность между ними, в том числе в угловых секундах (в последних двух столбцах). Как видно, разности не превышают 1 секунды дуги, что указывает на достаточно хорошую сходимость результатов.

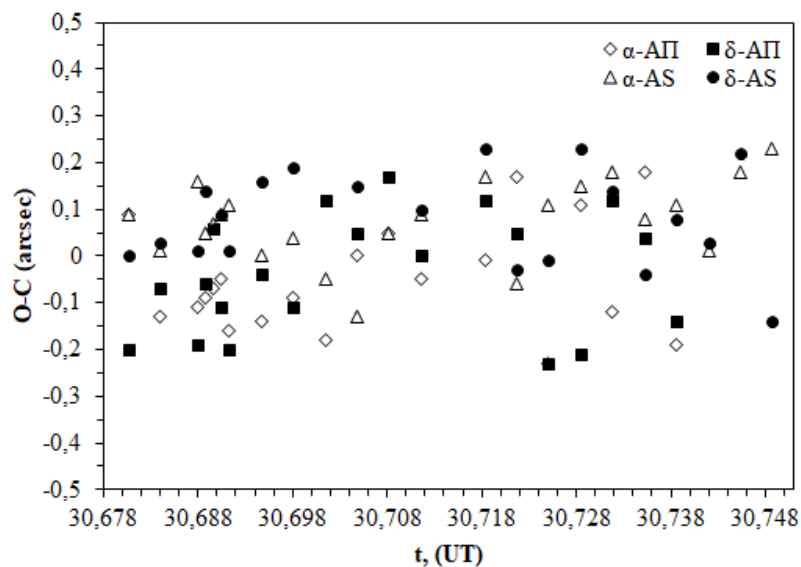


Рис.1.4. Зависимость отклонений (О-С) экваториальных координат астероида (596) Шейла от времени, найденные с использованием ПП АПЕКС-II и Astrometrica.

Таблица 1.5. Экваториальные координаты астероида Шейла по наблюдениям в обсерватории Санглох, вычисленные по двум программам астрометрической редукции

30 июля 2017 г.	ПП АПЕКС-II		ПП Astrometrica		$\Delta\alpha''$	$\Delta\delta''$
	α	δ	α	δ		
.68065	16 ^h 02 ^m 21 ^s .51	-25°53' 11".9	16 ^h 02 ^m 21 ^s .51	-25° 53'12".1	0	-0.2
.68403	16 02 21.58	-25 53 12.8	16 02 21.57	-25 53 12.9	0.01	-0.1
.68796	16 02 21.68	-25 53 13.9	16 02 21.66	-25 53 14.1	0.02	-0.2
.68877	16 02 21.69	-25 53 14.0	16 02 21.68	-25 53 14.2	0.01	-0.2
.68959	16 02 21.71	-25 53 14.3	16 02 21.70	-25 53 14.3	0.01	0
.69041	16 02 21.73	-25 53 14.5	16 02 21.72	-25 53 14.7	0.01	-0.2
.69123	16 02 21.75	-25 53 14.8	16 02 21.73	-25 53 15.1	0.02	-0.3
.69469	16 02 21.82	-25 53 15.6	16 02 21.81	-25 53 15.8	0.01	-0.2

.69807	16 02 21.90	-25 53 16.5	16 02 21.89	-25 53 16.8	0.01	-0.3
.70145	16 02 21.97	-25 53 17.5	16 02 21.96	-25 53 17.5	0.01	0
.70483	16 02 22.06	-25 53 18.4	16 02 22.05	-25 53 18.5	0.01	-0.1
.70819	16 02 22.13	-25 53 19.3	16 02 22.13	-25 53 19.3	0	0
.71157	16 02 22.21	-25 53 20.3	16 02 22.20	-25 53 20.4	0.01	-0.1
.71833	16 02 22.37	-25 53 22.0	16 02 22.37	-25 53 22.2	0	-0.2
.72508	16 02 22.52	-25 53 24.1	16 02 22.52	-25 53 24.3	0	-0.2
.72846	16 02 22.60	-25 53 24.8	16 02 22.58	-25 53 24.9	0.02	-0.1
.73184	16 02 22.68	-25 53 25.8	16 02 22.68	-25 53 25.9	0	-0.1
.7386	16 02 22.83	-25 53 27.7	16 02 22.82	-25 53 27.8	0.01	-0.1
.74197	16 02 22.90	-25 53 28.4	16 02 22.91	-25 53 28.4	-0.01	0
.74873	16 02 23.06	-25 53 30.2	16 02 23.04	-25 53 30.4	0.02	-0.2

Для наглядности на рис. 1.5 приведена видимая траектория астероида по обработке двух ПП, из которого также очевидна достаточная сходимость двух наборов данных. Координаты астероида по нашим наблюдениям, полученные с использованием двух ПП, а также данные других наблюдений (IAU MPC), приведенные на рис.1.6. и рис.1.7. указывают на соответствие наших измерений данным других наблюдений.

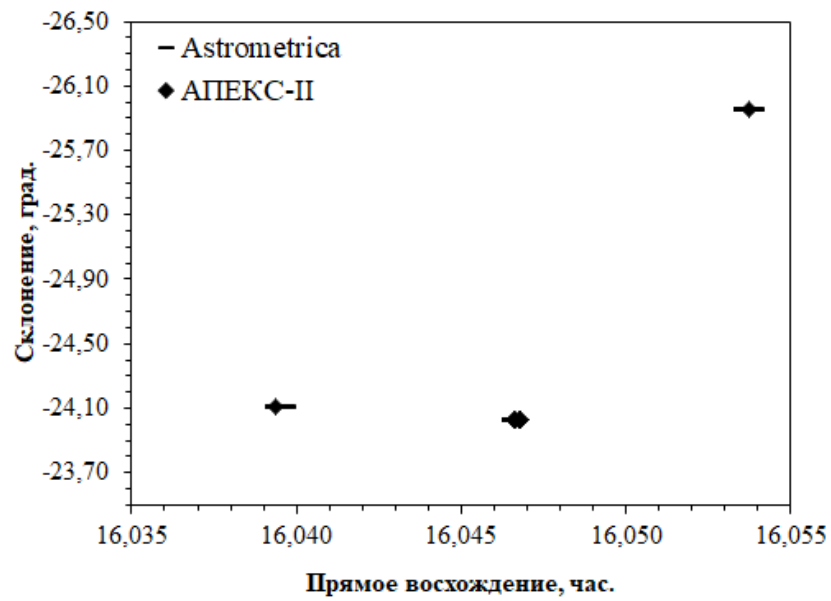


Рис.1.5. Видимая траектория астероида (596) Шейла по наблюдениям в обсерватории Санглох, определенная с использованием двух программ астрометрической редукции.

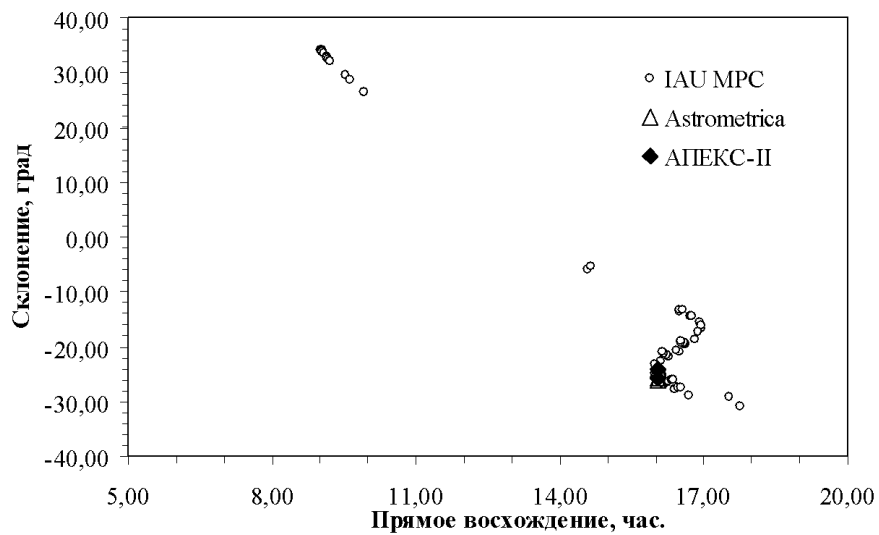


Рис.1.6. Видимая траектория астероида (596) Шейла по наблюдениям в обсерватории Санглох и другим наблюдениям.

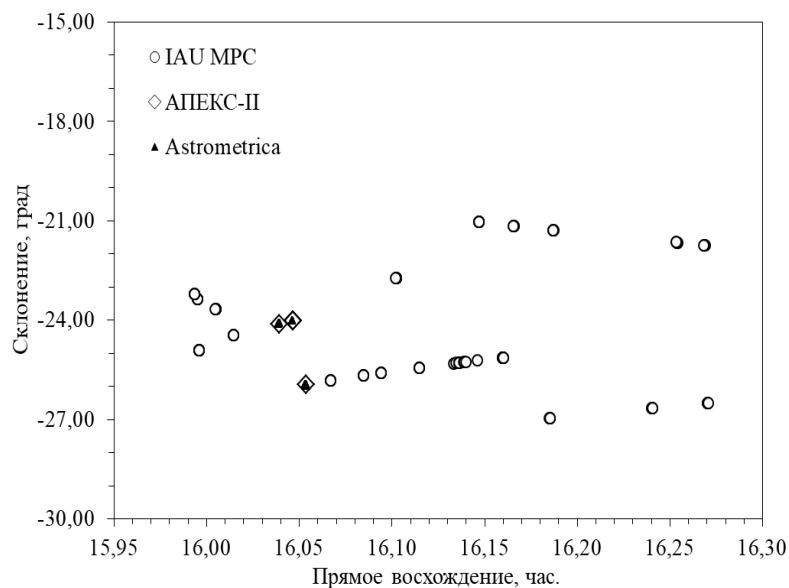


Рис.1.7. Видимая траектория астероида (596) Шейла по наблюдениям в обсерватории Сангloch и другим наблюдениям.

Выводы по главе I.

Таким образом, результаты астрометрии с использованием рассмотренных двух программных обеспечений свидетельствуют об их приемлемой точности и соответствии требованиям и критериям к качеству астрометрии, принятых в международных базах данных. Однако ПП АПЕКС-II, впервые внедренный в нашу практику, обеспечил более высокий уровень точности получаемых положений объектов и, как следствие, их видимых траекторий и орбит.

ГЛАВА II. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ КОРОТКОПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ

2.1. Результаты наблюдений кометы 17P/Холмса

Новая периодическая комета Солнечной системы была открыта Э. Холмсом 6 ноября 1892 г., в последствии получила официальное название комета 17P/Холмса [110]. 16 января 1893 г. отмечена мощная вспышка кометы, в результате увеличился ее блеск, и у кометы стало наблюдаться яркое ядро. В конце января комета снова ослабла до 11-12^m, однако в феврале австрийским астрономом И. Голчеком была отмечена еще одна небольшая вспышка, комета была видна в 15-см телескоп (9-10^m). В ноябре получен спектр кометы, непрерывный в ядре, коме и хвосте, присутствие каких-либо фраунгоферовых линий не отмечено [111]. Судя по наблюдательным данным и по последующим появлениям кометы, она была открыта в момент мощной вспышки. Так, для первой половины ноября абсолютный блеск кометы $H_{10}=0.0^m$, а в дальнейшем $H_{10}=6.0^m$. Во время вспышки 16 января $H_{10}= -0.5^m$. Отметим, что в момент открытия комета находилась на расстоянии 2.4 а.е. от Солнца.

По наблюдениям 1892 г. были определены элементы орбиты кометы (табл.2.1), оказавшейся короткопериодической [110]. Новые исследования и расчёты позволили уточнить дату перигелия и период обращения кометы. На основе найденной орбиты отвергнуто появившееся предположение, что комета Холмса является вернувшейся потерянной кометой Биэлы.

Комета вновь наблюдалась в 1899-1900 гг. и 1906 г., однако затем была потеряна. В 1963 г. получена модель движения кометы до 1975 г. и на этой основе 16 июля 1964 г. комета Холмса была переоткрыта Э. Рёмер [111].

В 2007 г. комета в 17-й раз после открытия возвратилась к Солнцу и 4 мая прошла точку перигелия орбиты.

Таблица 2.1. Элементы орбиты 17P/ Холмса

T = 1892 Июнь 13.979 (UT)		T = 2007 г. Май 4.4995 (UT)	
e = 0.409	$\omega = 14.37$	e = 0.432429	$\omega = 24.2585$
q = 2.142 а.е.	$\Omega = 331.64$	q = 2.053169 а.е.	$\Omega = 326.8675$
P = 6.902 год.	i = 20.79	P = 6.88 год.	i = 19.1132
		a = 3.617468 а.е	n = 0.1432508

Минимальное сближение с Землей на расстоянии 1.62 а.е. состоялось 6 ноября 2007 г. Максимум блеска кометы ожидался в июле-августе 2007 г. Элементы орбиты кометы, уточненные по наблюдениям 2007 г., приведены также в табл. 2.1.

После прохождения перигелия в мае блеск кометы 17P/Холмса в октябре 2007 г. был равен 17^м, и ее можно было наблюдать только телескопами. 23-24 октября зарегистрирована внезапная вспышка кометы и ее яркость возросла до 2-3^м [112], она стала видимой невооружённым глазом. Кривая видимого блеска кометы за период наблюдений 18.10.2007 г. по 16.02.2008 г. приведена на рис. 2.1 [113]. Первые дни после вспышки комета выглядела звездообразным объектом с угловым диаметром меньше угловой минуты. В конце октября 2007 г. диаметр комы вырос с 0.5 до 13 угловых минут, то есть почти до половины диаметра области, охватываемой на небе Луной. С учетом расстояния между Землей и кометой Холмса, равного 2 а.е., можно предположить, что в это время диаметр комы достиг примерно миллиона км, или около 70% диаметра Солнца. После вспышки, к 9 ноября, диаметр комы кометы превзошёл диаметр Солнца, и она стала самым большим по размеру объектом в Солнечной системе [12]. Отметим, что до вспышки 2007 г. диаметр ядра кометы оценен (очень приблизительно) как 3.4 км [114].

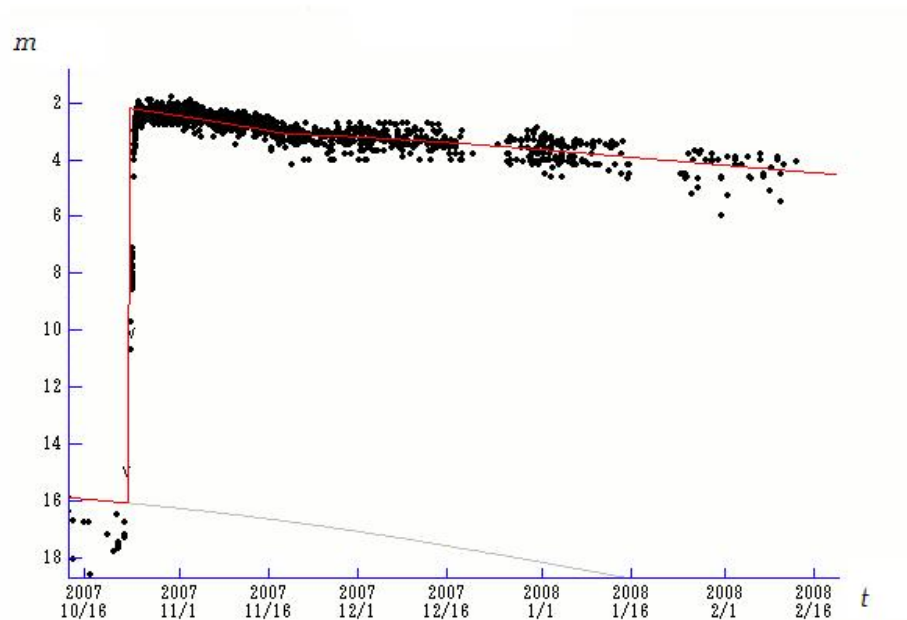


Рис. 2.1. Кривая блеска кометы 17P/Холмса в период вспышки яркости в 2007-2008 гг.

Наблюдения кометы 17P/Холмса выполнены в Гиссарской астрономической обсерватории Института астрофизики АН РТ с 29 октября по 18 ноября 2007 г. Использованы 40-см астрограф Цейсс, снабженный ПЗС-камерой ST-7 и телескопе АЗТ-8 ($D=0.7$ м, $f/4$ рефлексор) с ПЗС-камерой FLI ProLine PL1001E, поле зрения $30' \times 30'$. В период наблюдений получено более 150 изображений кометы с экспозициями от 0.001 сек до 2 минут. 29 октября 2007 г зарегистрирован крупный фрагмент ядра кометы Холмса образовавшийся в результате деления ядра [115,116]. Снимки, полученные после деления ядра кометы, приведены на рис. 2.1, где хорошо видны и крупный фрагмент, и сгущение на краю головы кометы.

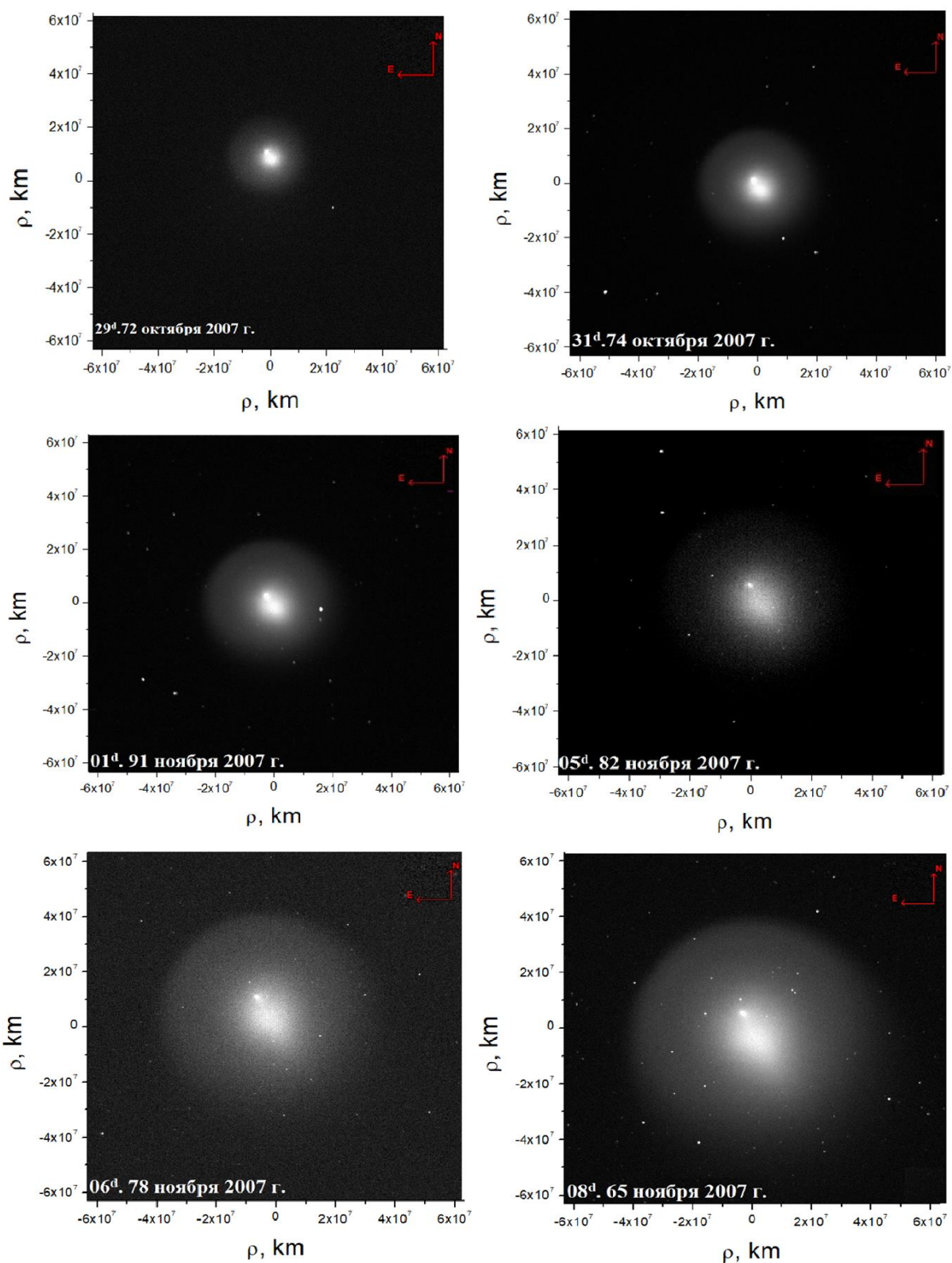


Рис. 2.2. Изображение кометы 17P/Холмса, полученное с 29^d.72 октября по 08^d.65 ноября 2007 г. на телескопе АЗТ- 8 ГисАО, где 29^d.72 октября впервые зарегистрирован фрагмент ядра.

Отметим, что наблюдения кометы в других обсерваториях также свидетельствуют о появлении крупной яркой неоднородности в голове кометы 24-25 октября 2007 г. Изображения кометы, полученные за девять ночей наблюдений на Гавайях с помощью большого телескопа со специальным фильтром Laplacian в ноябре 2007 г., имеют очень хорошее разрешение. По этим снимкам выделено почти 16 неоднородностей в голове кометы, которые расширялись со скоростями до 125 метров в секунду, а также зарегистрировать отделение от ядра кометы множества крупных частей (рис. 2.3) [12]. Это подтвердили и наблюдения кометы с помощью космического телескопа Хаббла [12].

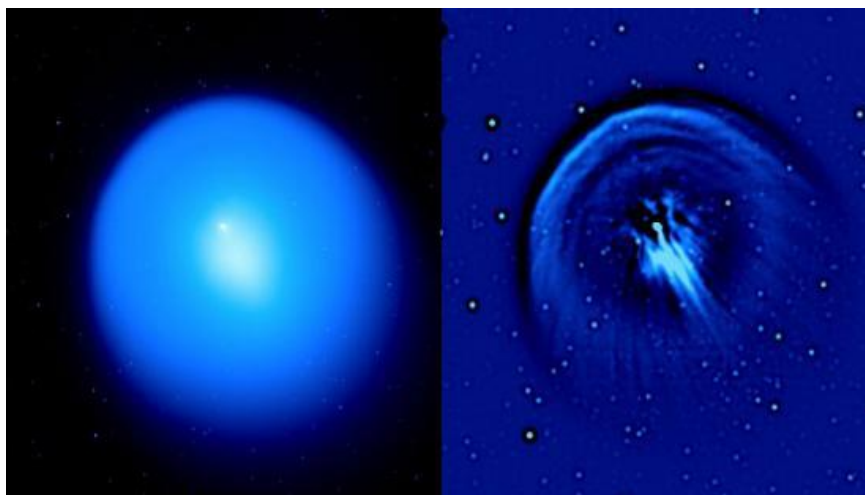


Рис 2.3. Изображение кометы 17P/Холмса, полученное с помощью большого телескопа на Гавайях [12].

Для астрометрической обработки использован ПП АПЕКС-II [9]. Первичная обработка кадров выполнена по стандартной процедуре. В качестве опорного использован астрометрический каталог UCAC5, в котором астрометрическая точность координат звезд не превышает 0.05". Средняя по всем кадрам ошибка астрометрической редукции не превышает 0.052" и 0.060" для прямого восхождения α и склонения δ , соответственно. В табл. 2.2.

представлены средние значения отклонений $(O-C)_\alpha$ и $(O-C)_\delta$ для координат α и δ , соответственно, а также их средние квадратичные ошибки σ_α и σ_δ по наблюдениям в ГисАО. Результаты определения координат кометы 17P/Холмса по наблюдениям в ГисАО приведены на рис. 2.4, где по оси абсцисс дано α – прямое восхождение и по оси ординат δ – склонение кометы.

Таблица 2.2. Средние разности $(O-C)$ и их стандартные отклонения для кометы 17P/Холмса

Дата	$(O-C)_\alpha$	σ_α	$(O-C)_\delta$	σ_δ
05.11. 2007	-0.050"	0.036"	-0.050"	0.032"
06.11. 2007	-0.040	0.026	-0.046	0.030
07.11. 2007	-0.050	0.052	-0.060	0.012
08.11. 2007	-0.050	0.052	-0.060	0.012
11.11. 2007	-0.065	0.026	0.035	0.060

Используя измеренные координаты кометы в нескольких положениях можно построить его орбиту. Определение первоначальной орбиты 17P/Холмса выполнялось с использованием ПП ЭПОС [30]. Для среднего момента наблюдений ГисАО с использованием 208 наблюдений удалось получить первоначальную орбиту комет, приведенную в табл. 2.3. 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, P - период обращения, σ - средняя квадратичная ошибка. В табл. 2.3. приведена для сравнения орбита, вычисленная на основе 5347 наблюдений астероида в различных обсерваториях согласно базе данных MPC [117], в последнем столбце приведены величины разности между вычисленной нами орбитой и орбитой MPC, обозначенные как χ . Как видно, с учетом разности моментов

времени, на которые вычислена орбита, по наблюдениям в ГисАО получена орбита, близкая к другим данным.

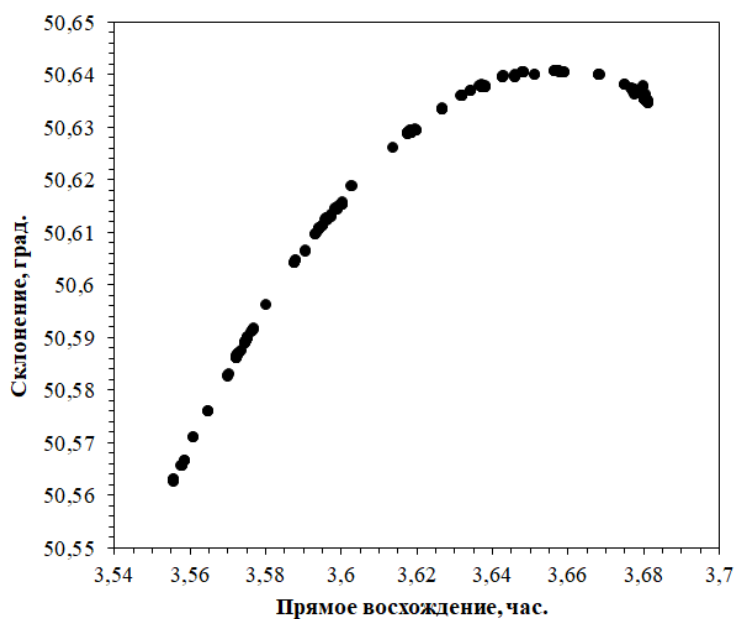


Рис. 2.4. Видимая траектория кометы 17P/Холмса по наблюдениям в ГисАО
5 – 11 ноября 2007 г.

Таблица 2.3. Сравнение первоначальной орбиты кометы 17P/Холмса,
полученной по наблюдениям в ГисАО, и орбиты MPC (J2000.0)

Элементы орбиты	ГисАО [данная работа]	[117],	χ
Кол-во положений, использованное для вычисления орбиты	208	5347	
T	JD 2456740.8	JD 2458716.1	-
Эпоха	JD 2454417.5	JD 2454240.5	-
e	0.433040 ± 0.00065	0.432431	-0.000609
a , а.е.	3.620015 ± 0.00057	3.617468	0.002546
q , а.е.	2.052404 ± 0.00048	2.053172	0.000770
i , град.	19.109671 ± 0.00048	19.113164	0.003489
ω , град.	24.268908 ± 0.00057	24.258344	-0.010568
Ω , град.	326.869061 ± 0.0033	326.867404	-0.001661
n , град./сут.	0.143100 ± 0.00017	0.143249	0.000149
P , годы	7.00	6.88	-
σ	0".700	0".600	-

2.1.1. Исследование деления ядра кометы 17P/Холмса

Наблюдательные данные подтвердили явление вспышки кометы Холмса 29 октября 2007 г. как результат деления ее ядра, также подтвержденный мониторингом. Деление является наиболее катастрофическим вариантом эволюции ядра кометы. При делении образуются фрагменты ядра кометы. Известны два типа деления ядра комет.

Тип 1: Деление ядра, после которого образуется небольшое количество фрагментов, как правило, два. Первичный более массивный фрагмент остается неизменным, вторичный фрагмент становится спутником в течение относительно длительного времени (день, месяц, и годы).

Тип 2: Деление ядра с образованием большого количества осколков, более 10 фрагментов, которые являются короткоживущими, возможно, из-за небольших размеров и масс.

Активные фрагменты могут проявить себя как микрокомета. В таком случае они имеют четкое отдельное ядро, кому и хвост, которые могут накладываться друг на друга. Со временем большинство мелких фрагментов кометы становятся слишком слабыми, чтобы быть обнаруженными даже крупными телескопами, и только основной крупный компонент (или два) "выживает" и остается доступным для дальнейших наблюдений.

Деление ядра кометы Холмса можно отнести к делению второго типа. На снимках кометы, полученных в ГисАО, видны два фрагмента (рис. 2.2). Из-за неблагоприятных условий наблюдений - засветка Луной, пылевая мгла с 12 по 18 ноября в начале и в конце периода наблюдений не удалось достаточно точно измерить положение фрагмента кометы. Поэтому для определения момента фрагментации кометы и скорости разлета фрагментов использованы только 273 качественных кадров, приведенных в табл. 2.4. Расстояние фрагмента L от фотометрического центра кометы (рис.2.5) для каждой ночи определялось по 3-

5 компьютерным изображениям кометы, значения L также даны в табл. 2.4. Для получения одного компьютерного изображения кометы использовались минимум 5 экспозиций, т.е. каждое изображение состоит минимум из 15 экспозиций.

Таблица 2.4 Сводка наблюдений кометы 17P/Холмса и расстояние фрагмента от фотометрического центра ядра

№	Дата наблюдений в 2007 г. (UT)	Количество снимков		$L \cdot 10^{-4}$, а.е.
		40-см астрограф	A3T-8	
1	29 ^d , 7213. X.		60	3.54
2	30 ^d , 7904. X.	3		4.55
3	31 ^d , 7467. X.	3		4.75
4	01 ^d , 9171. XI	5	37	5.31
5	02 ^d , 8721. XI	4	7	6.47
6	05 ^d , 8242. XI	4	35	8.87
7	06 ^d , 7879. XI	3	20	9.77
8	07 ^d , 9944. XI		50	8.99
9	08 ^d , 6528. XI		14	10.13
10	10 ^d , 6634. XI		14	11.05
11	11 ^d , 6472. XI		14	11.37

Зависимость найденного таким способом расстояния фрагмента от центра ядра кометы от времени наблюдений приведена на рис.2.5, из которого видно, что зависимость является линейной, поэтому скорость фрагмента можно оценить из соотношения

$$v = \frac{s}{t} \quad (2.1)$$

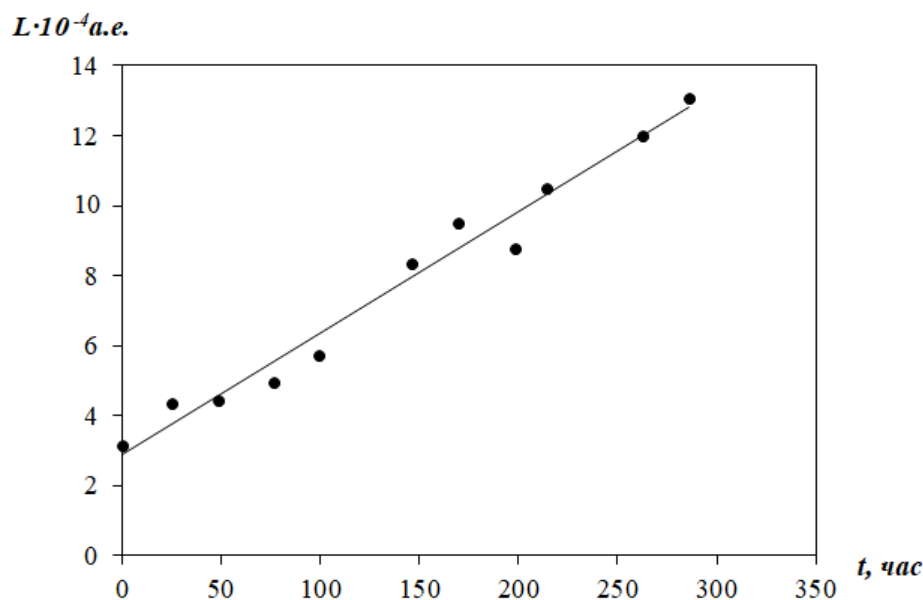


Рис.2.5. Изменение расстояния фрагмента от центра ядра кометы Холмса со временем наблюдений.

Оценка скорости разлета фрагмента, найденная по соотношению (2.1), оказалась равной $v=107\pm35$ м/с. Полученное оценочное значение скорости является относительно высоким, для того, чтобы объяснить наблюдаемую вспышку активизацией процессов сублимации льдов, тем более, с учетом гелиоцентрического расстояния кометы в тот период – 2.5 а.е.

В качестве причин деления ядра комет предложены различные механизмы. Среди них деление ядра под действием возмущений планет [18, 118,119], или сил кориолиса, возникающих при вращении ядра. Это могут быть активные химические реакции в ядре, переход льда из обычной формы в сверхплотное состояние, а также столкновение ядра с другим космическим телом, например, метеороидом. Мощная вспышка яркости кометы Холмса и большая скорость разлета фрагмента ядра накладывают ограничения на возможную причину деления ядра.

По мнению Williams et al. [120] причиной вспышки явилась особая нестабильная форма водяного льда, составляющего ядро кометы. Когда вода замерзает в обычных условиях на Земле, она образует довольно высокоупорядоченную кристаллическую структуру. Однако если воду охладить очень быстро до низких температур характерных дальним окраинам Солнечной системы, где, как считается, и сформировались кометы, молекулы воды «слипаются» друг с другом хаотическим образом. Образуется 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. При этом меняется структура вещества, и пузырьки газа, включенные в большом количестве в аморфный лед в процессе его застывания, в один момент высвобождаются. Весьма вероятно, что летучести, вмороженные в аморфный лед, высвобождаются сквозь микро - и макротрещины, в изобилии пронизывающие хаотичную структуру аморфного льда [120]. Сделано предположение, что во время приближения к Солнцу именно этот процесс мог произойти в комете Холмса, оценка мощности взрыва составляет 31 Кт в тротиловом эквиваленте и эта энергия соответствует преобразованию примерно 1 млн. тонн аморфного льда в обычный лед [120]. Это лишь небольшая часть массы кометы Холмса, имеющей ядро диаметром 3.4 км. В отличие от столкновения, этот процесс может повторяться, по крайней мере, несколько раз [120].

Согласно результатам наших наблюдений, распад ядра кометы 17P/Холмса произошёл $24^{\text{d}}.1 \pm 1^{\text{d}}.1$ октября 2007 г. (UT) [116], по данным [12] фрагментация состоялась $24^{\text{d}}.3 \pm 1.2$ октября 2007 г. (UT). Полученная оценка скорости разлета фрагментов ядра $v = 107 \pm 35$ м/с согласуется с оценками по другим наблюдениям: $v = 135 \pm 1$ м/с [10], $v = 132 \pm 4$ м/с [11], $v = 125 \pm 53$ м/с [12]. Известно, что, как правило, нормальное разделение ядра сопровождается скоростью разлета фрагментов порядка нескольких м/с [16,17]. В качестве

причин разделения ядра кометы предложены несколько механизмов, в которых учитываются приливные, термические и вращательные силы, и показано, что даже с учетом этих сил, скорость разлета фрагментов не превышает нескольких десятков м/с [18]. В работе [19] показано, что скорость разлета осколков в результате вращательной дезинтеграции ядра составляет в среднем 0.5 м/с. Скорость разлета фрагментов кометы 17P оказалась на два порядка выше рассмотренных оценок. В работе [12] предположено, что такие высокие скорости разлета осколков могут быть обусловлены ускорением за счет сил торможения выброса газа СО (или другого сверхлетучего газа). В статье [11] найдена скорость газообразования кометы 17P и предположено, что высокая скорость газообразования и, следовательно, разлета фрагментов, могут быть результатом взрыва некоторой области на поверхности 17P с высокой концентрацией сверхлетучестей или скоротечного явления выброса газа со всей поверхности ядра. В статье [10] наблюдательные данные интерпретированы в контексте взрывного явления, возможно, спровоцированного некоторым внешним нестабильным процессом, скорее всего, столкновением с астероидным телом.

Принимая во внимание имеющиеся пределы скоростей, вышеприведенные аргументы и гелиоцентрическое расстояние кометы 2.5 а.е. на момент наблюдений, что соответствует положению Главного пояса астероидов, сделано предположение, что с очень высокой вероятностью, причиной деления ядра кометы 17P в октябре 2007 г. является столкновение с небольшим астероидным телом или крупным метеороидом. Орбита кометы, вычисленная после деления ядра, сохранила стабильность, следовательно, столкновение не было катастрофичным, и не привело к изменению элементов орбиты.

2.2. Оптические наблюдения кометы 41P/Туттля-Джакобини-Кресака

Новая короткопериодическая комета семейства Юпитера впервые была открыта Х. Туттлем 3 мая 1858 года в обсерватории Гарвардского колледжа в Массачусетсе, затем независимо переоткрыта в 1907 г. М. Джакобини в обсерватории Ниццы во Франции и вновь в 1951 г. Л. Кресаком в обсерватории Скалната Плеса в Словакии. В честь открывателей комета имеет название 41P/Туттля-Джакобини-Кресака, далее по тексту 41P. Период обращения кометы вокруг Солнца равен 5.4 годам и поэтому она отнесена к короткопериодическим кометам, у которых период не превышает 200 лет, и они наблюдались в течение более чем одного прохождения перигелия, т.е. самой близкой к Солнцу точки ее орбиты. Афелий орбиты кометы или точка орбиты самая удаленная от Солнца расположен в районе орбиты Юпитера, вследствие этого комета классифицируется как комета семейства Юпитера.

В последний раз комета наблюдалась в момент прохождения перигелия в июне 2006 г., мониторинг очередного прохождения в ноябре 2011 г. был пропущен. Следующее такое явление ожидалось в апреле 2017 г., но оказалось, что в этот период произойдет редчайшее событие, комета не только приблизится к Солнцу, но и почти одновременно сблизится с Землей на минимальном расстоянии. Это первое тесное сближения кометы с Землей с момента ее открытия в 1858 г. Согласно [121] 1 апреля 2017 г. комета 41P имела тесное сближение с Землей, т.е. прошла от Земли на минимальном расстоянии 0.142 а.е. или 21.3 млн. км с относительной скоростью 8.6 км/с и достигла яркости 6^m видимых звездных величин. Через перигелий орбиты комета прошла 13 апреля 2017 г., при этом ее скорость относительно Солнца была равна 37.5 км/с.

Отметим, что в первой половине 21 века комета имеет одно тесное сближение с Юпитером и два – с Землей, из них самый близкий подход

произошел в 2017 г. В 2017 г. комета наблюдается в одиннадцатом появлении после открытия, а 19 появлений кометы было пропущено.

Согласно базе данных [121] абсолютный блеск ядра кометы в полосе V составляет $M=17.0^m$ зв.вел., общая абсолютная яркость кометы $M=15.3^m$ зв. вел., диаметр оценен как $d=1.4$ км [21], оценка периода вращения ядра кометы составляет от 20 часов [122] до 24-27 часов [123].

Комета 41P интересна своими сильными вспышками. В 1973 г. после вспышки она стала на 10 звездных величин ярче, чем была, став доступной невооружённому глазу. Однако, уже через несколько дней яркость кометы упала до 12^m . В декабре 2000 г. после вспышки она стала на 3 зв. вел. ярче, достигнув блеска около 8^m .

Элементы орбиты кометы 41P в равноденствии 2000.0 [121], приведены в табл. 2.5, где a – большая полуось, e – эксцентриситет, q, Q – перигелийное и афелийное расстояния, i – наклонение, ω – аргумент перигелия, Ω – долгота перигелия.

Таблица 2.5. Элементы орбиты кометы 41P/Туттля-Джакобини-Кресака (J2000.0)

Эпоха	a , а.е.	e	q , а.е.	Q , а.е.	i , град.	ω ,град.	Ω , град.
29.03.17	3.085	0.661	1.045	5.125	9.229	62.159	141.066

Актуальность изучения комет семейства Юпитера, появившихся в поясе Койпера, заключается в том, что лишь небольшое количество из них исследовано, особенно в том, что касается состава льдов их ядер в сравнении с долгопериодическими кометами, источником которых является облако Оорта. В связи с этим, поскольку во время сближения кометы с Землей и Солнцем создались благоприятные условия для ее наблюдений, 16-22 апреля 2017 г. нами проведены квазисинхронные наблюдения кометы 41P/Туттля-Джакобини-Кресака на телескопе Цейсс-1000 Международной астрономической

обсерватории Санглох (МАОС) и телескопе АЗТ-8 Гиссарской астрономической обсерватории (ГисАО) Института астрофизики АН РТ. Регистрация объекта выполнялась с помощью ПЗС-камер FLI 16803 и 9000 серии ProLine с использованием широкополосных фотометрических фильтров системы Джонсона-Козинса – *BVRI*, при этом экспозиции составляли от 5 до 60 секунд. Для уменьшения уровня шумов ПЗС камеры аппаратура была охлаждена до температуры -20°C . Чтобы учесть темновой сигнал в течение наблюдательной ночи были получены темновые кадры «Dark», которые при обработке вычитались из рабочих кадров. Для получения снимков с равномерным полем были использованы кадры с плоскими полями «Flat», наблюдаемые при вечерних или утренних сумерках. Для учета ошибок матриц ПЗС-камер снимались кадры «Bias», которые также использовались в обработке кадров. Во время наблюдений в МАОС было получено 192 изображения объекта за 16 и 18 апреля и в ГисАО - 638 снимков за 18-25 апреля. Положение орбиты кометы во время мониторинга в МАОС и ГисАО и детали выполненных экспозиций приведены в табл.2.6, где r и Δ - расстояния кометы от Земли и Солнца, ph - фазовый угол, N и t – количество и время экспозиций.

Таблица 2.6. Сводка наблюдений кометы 41P/ Туттля-Джакобини-Кресака в МАОС и ГисАО

Дата	r , а.е.	Δ , а.е.	ph , град.	$N \times$ Фильтр		t , с
				МАОС	ГисАО	
16.04.2017	1.046	0.159	70.1	33xB, 35xV, 35xR, 37xI	-	5-60
18.04.2017	1.048	0.163	70.0	15xB, 15xV, 15xR, 15xI	44xB, 44xV, 44xR, 44xI	5-10
19.04.2017	1.049	0.165	69.8	-	30xB, 30xV, 30xR, 30xI	5-60
22.04.2017	1.054	0.172	69.0	-	30xB, 30xV, 30xR, 30xI	5-30
23.04.2017	1.056	0.173	68.6	-	38xB, 38xV, 38xR, 38xI	5-30
25.04.2017	1.060	0.178	67.7	-	20xB, 20xV, 20xR, 20xI	5-60

2.2.1. Определение координат, траектории и орбиты кометы

Астрометрическая обработка кадров проведена с помощью программного пакета (ПП) Astrometrica [124]. Изображения кометы, полученные в ГисАО и МАОС, приведены на рис. 2.6.



Рис. 2.6. Изображения кометы 41P/Туттля-Джакобини-Кресака, телескоп АЗТ–8 ГисАО, 23 апреля 2017 г., экспозиция 30 сек. (слева) и телескоп Цейсс-1000 МАОС, 16 апреля 2017 г., экспозиция 15 сек. (справа).

Экваториальные координаты кометы, найденные в результате астрометрической обработки наблюдений МАОС и ГисАО, приведены в табл. 2.7 и 2.8, где также дан найденный блеск кометы в четырех фильтрах. Видимая траектория показана на рис. 2.7, где по оси абсцисс даны прямое восхождение α и по оси ординат – склонение δ .

Таблица 2.7. Экваториальные координаты и яркость короткопериодическая кометы 41P/Туттля-Джакобини-Кресака по наблюдениям в ГисАО.

№	Дата, 2017	Момент наблюдений (UT)	α	δ	m (зв.вел.)
1	18 апреля	19 ^h 46 ^m 14 ^s	17 ^h 24 ^m 36 ^s .05	+52°35'17.54"	13.8
2	18 апреля	19 46 26	17 24 36.05	+52 35 17.51	13.9
3	18 апреля	19 46 38	17 24 17.62	+52 26 25.38	13.5
4	18 апреля	19 46 50	17 24 17.55	+52 26 24.21	13.9
5	18 апреля	19 47 02	17 24 17.52	+52 26 24.09	13.2
6	18 апреля	19 47 14	17 24 17.53	+52 26 24.14	13.1
7	19 апреля	19 12 15	17 30 08.04	+51 20 17.01	13.2
8	19 апреля	19 12 37	17 30 08.19	+51 20 18.23	13.5
9	19 апреля	19 12 59	17 30 08.23	+51 20 19.13	13.4
10	19 апреля	19 13 21	17 30 08.25	+51 20 19.6	13.1
11	19 апреля	19 13 44	17 30 08.27	+51 20 20.34	13.1
12	19 апреля	19 14 06	17 30 08.27	+51 20 20.91	13.1
13	22 апреля	19 46 25	17 45 36.55	+48 03 37.22	13.6
14	22 апреля	19 46 37	17 45 36.50	+48 03 37.34	13.7
15	22 апреля	19 46 49	17 45 36.51	+48 03 38.15	14.1
16	22 апреля	19 47 26	17 45 36.56	+48 03 38.03	14.4
17	22 апреля	19 47 36	17 45 36.55	+48 03 38.56	14.3
18	22 апреля	19 48 29	17 45 36.58	+48 03 38.99	14.3
19	23 апреля	20 09 49	17 49 59.83	+46 52 52.31	14.5
20	23 апреля	20 10 01	17 51 00.39	+46 52 44.37	13.1
21	23 апреля	20 10 13	17 51 00.34	+46 52 44.76	13.9
22	23 апреля	20 10 25	17 51 00.37	+46 52 44.93	13.0
23	23 апреля	20 10 37	17 51 00.35	+46 52 45.26	13.1
24	23 апреля	20 11 00	17 51 00.33	+46 52 45.51	13.4
25	25 апреля	16 41 48	17 58 10.73	+44 58 52.03	14.5
26	25 апреля	16 42 00	17 58 10.79	+44 58 52.20	14.9
27	25 апреля	16 42 44	17 58 10.77	+44 58 51.85	15.2
28	25 апреля	16 42 56	17 58 10.76	+44 58 50.46	15.3

Таблица 2.8. Экваториальные координаты и яркость короткопериодическая кометы 41P/ Туттля-Джакобини-Кресака по наблюдениям в МАОС.

№	Дата, 2017	Момент наблюдений (UT)	α	δ	m (зв.вел.)
1	16 апреля	20 ^h 47 ^m 33 ^s	17 ^h 11 ^m 02.80 ^s	+54°50' 06.70"	12.3
2	16 апреля	20 48 45	17 11 17.83	+54 29 14.30	12.3
3	16 апреля	20 49 56	17 11 21.41	+54 39 42.30	12.4
4	16 апреля	20 51 09	17 11 42.69	+54 52 54.70	13.5
5	16 апреля	20 52 21	17 11 06.59	+54 36 38.00	12.2
6	16 апреля	20 53 34	17 12 29.10	+54 37 03.40	12.2
7	16 апреля	20 54 45	17 11 19.38	+54 47 15.20	12.0
8	16 апреля	20 55 58	17 10 26.71	+54 43 07.60	12.2
9	16 апреля	20 57 10	17 10 51.77	+54 36 28.40	12.3
10	16 апреля	20 58 21	17 10 03.18	+54 39 19.50	12.9
11	16 апреля	21 00 56	17 11 41.19	+54 42 20.00	12.4
12	16 апреля	21 02 28	17 10 15.58	+54 44 19.50	12.2
13	16 апреля	21 04 00	17 11 09.21	+54 51 50.60	12.2
14	16 апреля	21 17 24	17 11 44.32	+54 48 31.50	12.0
15	16 апреля	21 19 13	17 10 50.65	+54 30 07.70	12.0
16	18 апреля	20 20 13	17 27 05.25	+52 33 20.40	12.7
17	18 апреля	20 21 24	17 25 39.59	+52 29 57.50	13.1
18	18 апреля	20 22 36	17 25 09.11	+52 32 57.40	12.9
19	18 апреля	20 23 49	17 25 54.12	+52 29 56.60	12.9
20	18 апреля	20 25 01	17 24 25.49	+52 33 52.90	12.9
21	18 апреля	20 26 53	17 25 41.48	+52 34 35.10	12.6
22	18 апреля	20 28 25	17 25 44.13	+52 29 57.40	13.2
23	18 апреля	20 29 57	17 25 15.78	+52 25 51.60	13.2
24	18 апреля	20 31 29	17 25 13.88	+52 27 19.70	13.2
25	18 апреля	20 33 01	17 24 22.87	+52 15 39.20	13.1
26	18 апреля	20 36 55	17 25 22.99	+52 23 13.90	13.8
27	18 апреля	20 38 27	17 24 56.99	+52 27 53.40	13.3
28	18 апреля	20 39 59	17 25 46.53	+52 33 13.70	13.4
29	18 апреля	20 41 31	17 24 15.27	+52 31 19.50	13.4

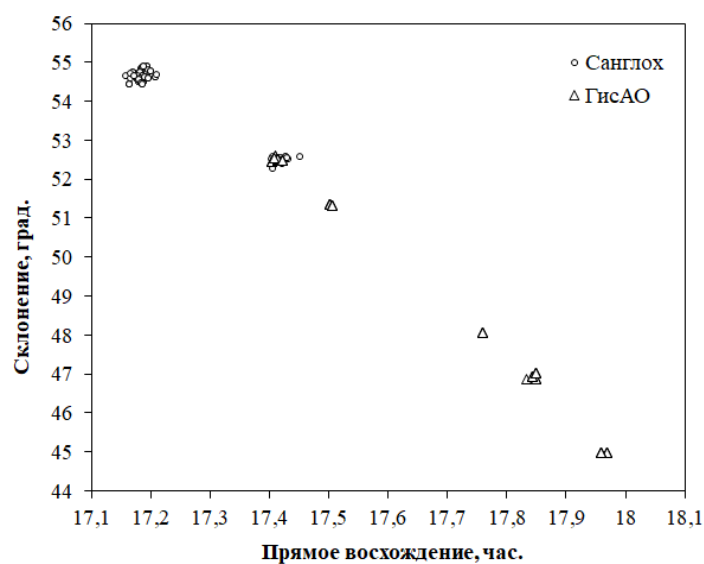


Рис. 2.7. Видимая траектория кометы 41P по наблюдениям в Таджикистане.

В табл. 2.9 представлены средние значения отклонений $(O-C)_\alpha$ 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 и ГисАО 16 - 25. 04.2017 г. Как видно из табл. 2.9, средняя по всем кадрам ошибка астрометрической редукиции не превышает 0.07" и 0.09" для α и δ , соответственно.

Таблица 2.9. Точность наблюдений кометы 41P/Туттля-Джакобини-Кресака

Дата	$(O-C)_\alpha$	σ_α	$(O-C)_\delta$	σ_δ
16.04.2017	-0.918"	0.095"	-0.717"	0.077"
18.04.2017	-0.197"	0.041"	-0.471"	0.076"
19.04.2017	-0.088"	0.073"	-0.604"	0.026"
22.04.2017	-0.825"	0.035"	-0.999"	0.019"
23.04.2017	-0.221"	0.053"	-0.497"	0.032"
25.04.2017	-0.421"	0.073"	-0.501"	0.041"

На основе найденных из наблюдений координат с помощью ПП Find_orb [82] вычислена орбита кометы. Результаты представлены в табл.2.10, где для сравнения также дана орбита, найденная по наблюдениям, собранным в Международном центре малых планет (MPC) [125]. В табл. 2.10 наряду с обычными элементами также даны n – среднее движение кометы, P – период обращения, σ – среднеквадратичная ошибка в угловых секундах. Как видно, по наблюдениям в МАОС и ГисАО получена орбита близкая к орбите по данным MPC.

Таблица 2.10. Элементы орбиты кометы 41P/ Туттля-Джакобини-Кресака (J2000.0) по данным различных наблюдений

Элементы орбиты	МАОС [данная работа]	ГисАО [данная работа]	[125]
Кол-во положений, использованное для вычисления орбиты	80	150	3151
T	12 апреля 2017 JD 2457856.3	12 апреля 2017 JD 2457856.3	12 апреля 2017 JD 2457856.3
Эпоха	22 апреля 2017 JD 2457865.5	22 апреля 2017 JD 2457865.5	28 марта 2017 JD 2457840.5
e	0.659345 ± 0.00065	0.659340 ± 0.00024	0.661194
a , а.е.	3.067328 ± 0.00041	3.067322 ± 0.00021	3.084490
q , а.е.	1.044894 ± 0.00037	1.044915 ± 0.00024	1.045040
i , град.	9.207468 ± 0.00065	9.207571 ± 0.00014	9.228840
ω , град.	62.156124 ± 0.00165	62.155991 ± 0.00047	62.156570
Ω , град.	141.06697 ± 0.00145	141.066791 ± 0.00054	141.068040
n , град./сут.	0.183548 ± 0.00046	0.183470 ± 0.00012	0.189414
P , годы	5.37	5.37	5.42
σ''	0.462	0.662	0.700

Анализ результатов астрометрии показывает достаточно хорошую точность определения координат и блеска из наблюдений как в МАОС, так и в ГисАО, при этом данные двух телескопов хорошо согласуются между собой. Об этом свидетельствуют и элементы орбит, вычисленные по трем разным наблюдениям и различающиеся в пределах ошибок измерений, и соответствие блеска кометы по наблюдениям в Таджикистане с данными мирового мониторинга.

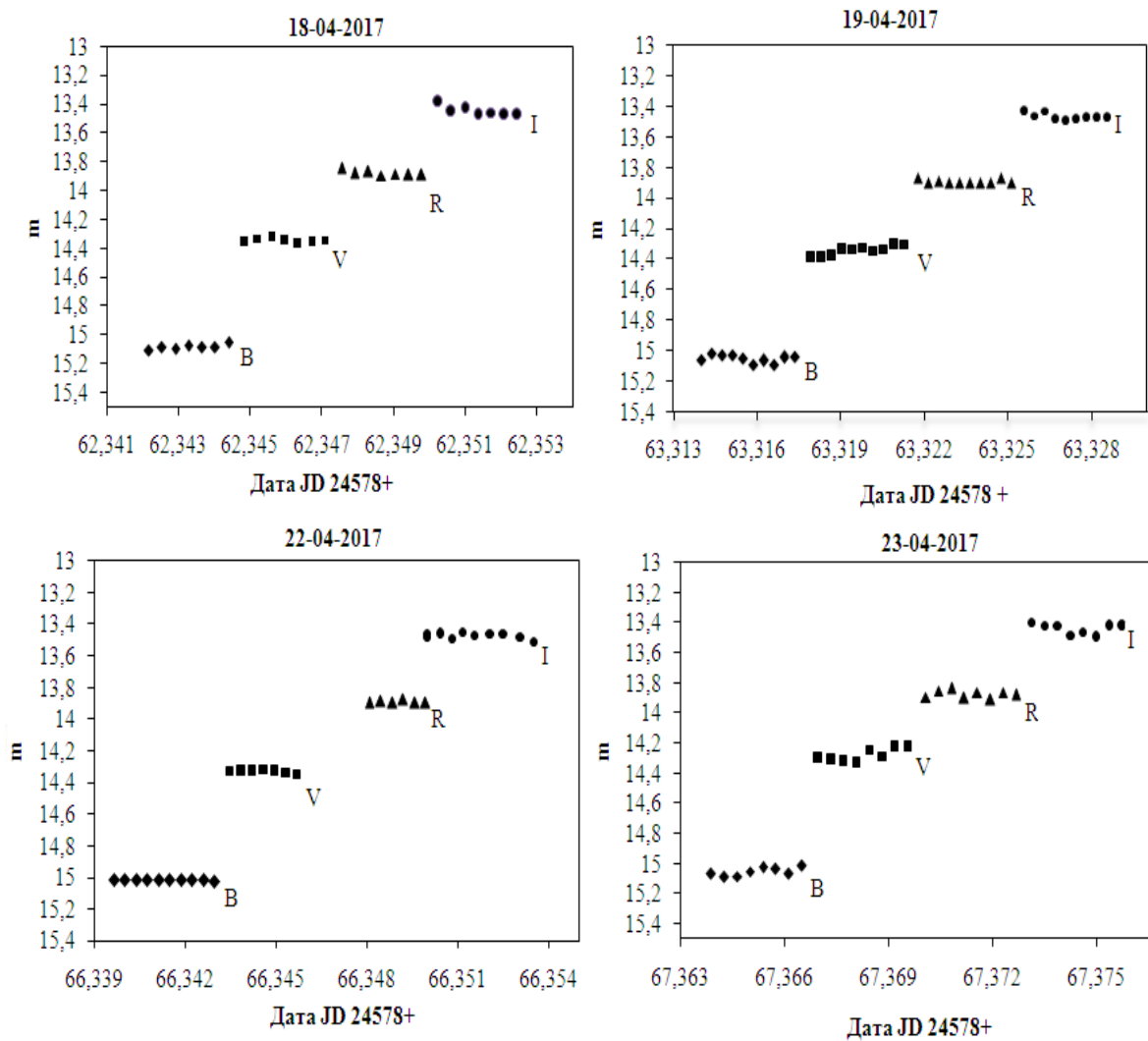
2.2.2. Определение видимых и абсолютных звездных величин, показателей цвета и оценка диаметра ядра кометы 41P/ Туттля-Джакобини-Кресака

Для фотометрической обработки были использованы наблюдения ГисАО, так как на МАОС ночи не были строго фотометрическими. Фотометрическая обработка выполнена с помощью программы MaxImDL-5 [126]. Для определения относительного блеска выбраны звезды сравнения из каталогов TYCHO-2 и USNO-A 2.0 [127], находящиеся вблизи кометы, для которых блеск определен с точностью в пределах 0.004^m - 0.018^m . По ним были определены звездные величины ядра кометы 41P m в фильтрах $BVRI$ и построены кривые блеска по наблюдениям пяти ночей, представленные на рис.2.8, где по оси ординат отложены измеренные значения m в звёздных величинах и по оси абсцисс - даты наблюдений в юлианских днях. Средние значения m ядра, полученные в разных фильтрах даны в табл. 2.11. Таким образом, инструментальные звездные величины переводились в систему относительных звездных величин с помощью каталогов TYCHO2 и USNO-A 2.0, но без учета данных стандартной фотометрической системы. Это связано с тем, что пока не выполнена калибровка системы телескоп - камера - фильтры, и, следовательно, нет привязки к фотометрическим стандартам.

Таблица 2.11. Видимые звездные величины* m ядра кометы 41P/Туттля-Джакобини-Кресака по наблюдениям в ГисАО

Фильтр	04.18,823	04.19,802	04.22,824	04.23,841	04.25,695
B	13.47±0.02	13.55±0.02	13.78±0.01	13.52±0.03	13.83±0.01
V	12.87±0.01	13.25±0.03	13.40±0.01	13.09±0.03	13.21±0.01
R	12.72±0.01	12.75±0.02	12.68±0.01	12.79±0.03	12.72±0.02
I	12.41±0.01	12.39±0.01	12.41±0.01	12.50±0.03	12.37±0.01

* оценка звездной величины в апертурном радиусе (размер апертюры 3 угловых сек., что соответствует 2567, 93 км).



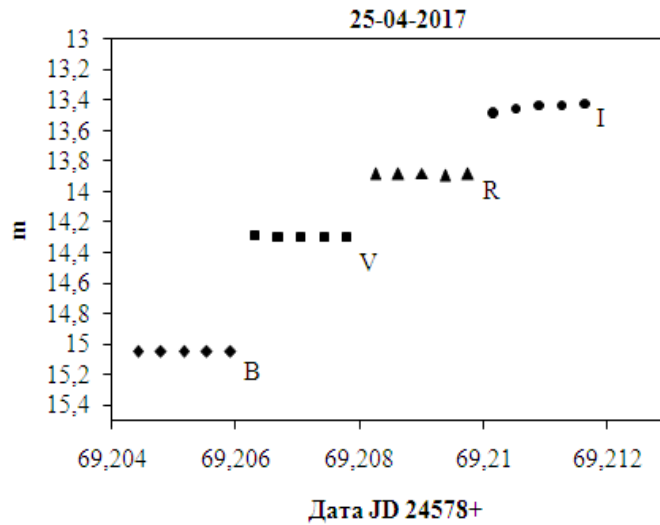


Рис.2.8. Видимые звездные величины ядра кометы 41P/Туттля-Джакобини-Кресака в фильтрах *BVRI* по наблюдениям в ГисАО с 18 по 25 апреля 2017 г.

Видимые звездные величины m_a конвертировались в абсолютные звездные величины ядра кометы $m_a(1,1,0)$ с использованием эмпирического уравнения (1.9) [94-95]. Абсолютные звездные величины ядра кометы в фильтрах *BVRI* (средние значения за пять ночей), найденные по формуле (1.9), приведены в табл. 2.12, зависимость абсолютной яркости кометы, обозначенная на графике H , от даты наблюдений (в юлианских днях) в ГисАО приведена на рис. 2.9. Как видно, в период мониторинга абсолютные звездные величины кометы практически были постоянными.

Таблица 2.12. Абсолютные звездные величины $m_a(1,1,0)$ ядра кометы 41P/Туттля-Джакобини-Кресака по наблюдениям в ГисАО 18-25 апреля 2017 г.

Фильтр	04.18,823	04.19,802	04.22,824	04.23,841	04.25,695
B	16.49±0.03	16.43±0.06	16.36±0.06	16.37±0.02	16.29±0.04
V	15.75±0.06	15.75±0.03	15.66±0.04	15.64±0.01	15.61±0.02
R	15.26±0.01	15.27±0.01	15.18±0.04	15.16±0.02	15.13±0.03
I	14.84±0.01	14.85±0.03	14.76±0.01	14.73±0.03	14.70±0.02

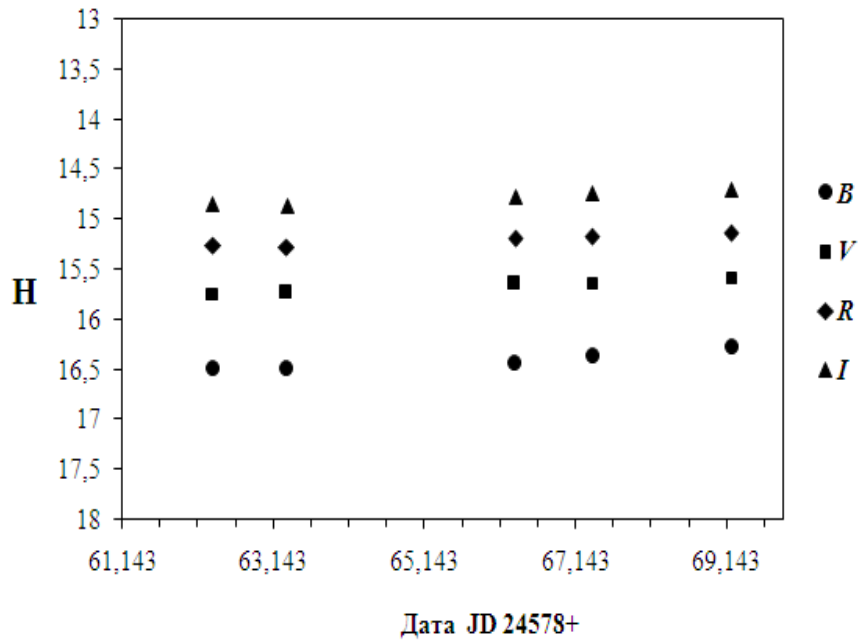


Рис. 2.9. Абсолютные звездные величины H (средние значения) кометы 41P/Туттля-Джакобини-Кресака в фильтрах $BVRI$ по наблюдениям в ГисАО с 18 по 25 апреля 2017 г.

Разность между значениями звездных величин в разных фильтрах называется показателем цвета (колор-индекс), и эта величина сама по себе не дает много информации о физических свойствах ядер комет. Однако сравнение показателей цвета с другими объектами Солнечной системы или их возможная корреляция с другими параметрами (размером, элементами орбит и др.) могут иметь большое значение в определении происхождения и эволюции кометных ядер, а также их взаимосвязей. Инструментальные показатели цвета кометы по нашим наблюдениям, 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) приведены в табл.2.13. Как видно, показатели цвета кометы 41P по наблюдениям в ГисАО хорошо согласуются со средними показателями цвета для активных комет семейства Юпитера и подтверждают хорошо известный

результат, что по спектральным характеристикам кометные ядра статистически более красные, чем Солнце [22]. Отметим, что в реальности их показатели цвета очень разнообразны и занимают области спектра от слегка синей до значительно красной [21]. Аналогичные показатели цвета имеют астероиды спектральных классов D и T, имеющие низкое альbedo и красноватый спектр отражения, а по минералогическому составу соответствующие силикатам, богатым углеродом или органическими соединениями [69].

Для оценки размера ядра кометы использовано эмпирическое соотношение между измеренными в фильтре V видимыми звездными величинами $m_V(1,1,0)$ и эффективным радиусом ядра кометы r_N в метрах [23]

$$A_R r_N^2 = 2.238 \cdot 10^{22} R_h^2 \Delta^2 10^{0.4(m_\odot - m_V + \beta\alpha)}, \quad (2.2)$$

или, когда определен абсолютный блеск $m_V(1,1,0)$, радиус вычисляется по упрощенной модификации формулы (2.2)

$$A_R r_N^2 = 2.238 \cdot 10^{22} R_h^2 \Delta^2 10^{0.4(m_\odot - m_V(1,1,0))}, \quad (2.3)$$

где A_R – геометрическое альbedo и $m_\odot = -26.75$ видимые звездные величины Солнца, причем обе величины в фильтре V. Установлено, что кометы являются исключительно темными объектами, и с учетом этого, для геометрического альbedo принято обычное для комет среднее значение $A_R = 0.04$ [21, 128]. Результаты оценки радиуса ядра кометы приведены в табл. 2.14.

Таблица 2.13. Инструментальные показатели цвета кометы 41P/Туттля-Джакобини-Кресака в сравнении с данными для различных объектов Солнечной системы

Колор-индекс	41P/Туттля-Джакобини-Кресака, данная работа, 2017 г.					Active JFC		Active LPC	Kuiper belt objects	Солнце
	18.04	19.04	22.04	23.04	25.04	[22]	[23]	[22]	[22]	[24]
B-V	0.77	0.72	0.70	0.71	0.70	0.74	0.75	0.78	0.93	0.65
V-R	0.47	0.46	0.47	0.47	0.46	0.46	0.47	0.47	0.57	0.35
R-I	0.43	0.42	0.42	0.43	0.44	0.44	0.43	0.42	-	0.28
B-R	1.20	1.18	1.17	1.20	1.16	1.10	1.22	1.23	1.52	-

Таблица 2.14. Оценка размера ядра кометы 41P/ Туттля-Джакобини-Кресака по наблюдениям в ГисАО

Дата	r , а.е.	Δ , а.е.	ph , град.	m_V , зв.вел.	$m_V(1,1,0)$, зв.вел.	D , Км
04.18,823	1.048	0.163	70.0	14.35±0.01	15.75±0.06	4.73±0.04
04.19,802	1.049	0.165	69.8	14.34±0.03	15.75±0.03	4.75±0.04
04.22,824	1.054	0.172	69.0	14.36±0.01	15.66±0.04	4.95±0.04
04.23,841	1.056	0.173	68.6	14.34±0.03	15.64±0.01	4.98±0.04
04.25,695	1.060	0.178	67.8	14.34±0.01	15.61±0.02	5.03±0.04

Как было отмечено, диаметр ядра кометы 41P/Туттля-Джакобини-Кресака оценен как 1.4 км на основе гелиоцентрической кривой блеска [129]. По нашим данным, оценка диаметра заключена в пределах 4.7-5.0 км. Такое несоответствие можно объяснить либо устаревшей оценкой, либо некорректным выбором апертуры фотометрических измерений ядра кометы. Для уточнения размера необходимо продолжить наблюдения кометы.

2.3. Оптические наблюдения кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1

Новая короткопериодическая 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 $T_J=2.984$ [28]. 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 характерно хаотические орбиты [130-132]. Оказалось, что указанные параметры орбиты 29P удовлетворяют этому условию, и поэтому комета была отнесена к группе кентавров [131]. Элементы орбиты кометы 29P, приведены в табл. 2.15, где a – большая полуось, e – эксцентриситет, q , Q – перигелийное и афелийное расстояния, i – наклонение, ω – аргумент перигелия, Ω – долгота перигелия [121].

Таблица 2.15. 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.
19.01.2010	5.989	0.045	5.719	6.259	9.393	48.802	312.634

Двойственность кометы связана с очень малым значением эксцентриситета, вследствие чего она движется вокруг Солнца по почти круговой орбите, нехарактерной для комет – такие орбиты обычно имеют астероиды и планеты. К настоящему моменту известны более 45 таких объектов, являющихся ледяными телами и располагающимися между орбитами

Юпитера и Нептуна. Орбита кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 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 достаточно низкой для того, чтобы твердое состояние воды и других летучих соединений было стабильным даже под воздействием прямых солнечных лучей.

Предполагается, что кентавры являются объектами, переброшенными из пояса Койпера во внутреннюю область планетной системы, где для наземных наблюдений они проявятся как короткопериодические кометы [130 -134]. В этом смысле кентавры с научной точки зрения интересны как близкие, т.е. более яркие и доступные для изучения образцы объектов пояса Койпера.

О двойственности кометы говорят и ее физические свойства, найденные по наземным наблюдениям. Известно, что для кометных ядер значение альбедо обычно варьирует в пределах от 0.02 до 0.12, среднее значение 0.07 [38]. Геометрическое альбедо 29P/Швассмана-Вахмана 1, найденное из фотометрии в видимом спектральном диапазоне, составляет $p_V=0.13$ [26], и если это корректные измерения, альбедо является совершенно нетипичным для кометного ядра. В то же время, эта величина альбедо свойственна объектам группы кентавров [135]. 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. Для геометрического альбедо ядра кометы согласно данным [121] 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 радиуса 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 [21]. В

работе [26] 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 [27]. Использование величины альбедо 0.13 уменьшает это значение радиуса до 8.6 км [21]. Для периода вращения кометы также имеется несколько оценок, 14.0 ч. [27], 10 ч. [136], причем последние авторы определили вторичный период 32.2 ч. подразумевая полное положение вращения. В работе [137] по наблюдениям 2008-2009 гг. получена оценка периода вращения 11.7-12.1 ч. Согласно базе данных [28] общая абсолютная яркость кометы составляет $M_1=6.0^m$ зв. вел., диаметр $D=60.4$ км. С момента открытия комета 29P/Швассмана-Вахмана 1 стала известной своими многочисленными постоянными вспышками, т.е. внезапным резким увеличением яркости, когда блеск кометы увеличивается на $2^m - 5^m$ зв. вел. [16, 138-141]. 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 [142]. Обычно вспышки короткопериодических комет связаны с делением ядра, но этот процесс единовременный и не продолжительный. 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 [143], 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, [29]. В [142] показано, что вспышки блеска обусловлены увеличением газообразующей активности кометы, и в первую очередь, увеличением производства нейтрального газа CO. Однако, как показали в [141], 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/Швассмана-Вахмана 1 до сих пор является открытым.

Актуальность изучения комет из группы кентавров, источником которых является пояс Койпера, заключается в том, что исследовано лишь небольшое количество таких объектов. Особый интерес представляет изучение состава льдов их ядер и его сравнение с составом ядер долгопериодических комет, источником которых является облако Оорта. Как уже отмечено, механизмы, ответственные за проявление кометной активности на удаленных гелиоцентрических расстояниях, до сих пор еще не установлены.

В 2017 г. комета 29P в очередной раз проявила активность и стала доступной для наблюдений. 28 июля – 1 августа 2017 г. нами проведены наблюдения 29P на телескопе Цейсс-1000 Международной астрономической обсерватории Санглох (МАОС) Института астрофизики АН РТ. Регистрация объекта выполнялась с помощью ПЗС-камеры FLI 16803 серии ProLine с использованием широкополосных фотометрических фильтров системы Джонсона-Козинса – *BVRI*, при этом экспозиции составляли 60 секунд. Были получены кадры «Dark», «Flat» «Bias», которые также использовались в 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. 2.16. где r и Δ - расстояния кометы от Земли и Солнца, ph - фазовый угол, PA –

позиционный угол направления на Солнце, N и t – количество и время экспозиций.

Таблица 2.16. Сводка наблюдений кометы 29P/Швассмана - Вахмана 1
в обсерватории Санглох

Дата	r , А.е.	Δ , а.е.	PA , град.	ph , град.	N х Фильтр	t , с
					МАОС	
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

2.3.1. Определение динамических свойств кометы

Астрометрическая обработка кадров проведена с помощью программного пакета (ПП) АПЕКС-II [9]. Изображение кометы во время наблюдений приведено на рис. 2.10.

Экваториальные координаты кометы, найденные в результате астрометрической обработки наблюдений МАОС [144], в виде графика приведены на рис. 2.11, где по оси абсцисс даны прямое восхождение α и по оси ординат – склонение δ , некоторые координаты приведены в табл. 2.17.

В табл. 2.18 представлены средние значения отклонений $(O-C)_\alpha$ и $(O-C)_\delta$ для координат α и δ , соответственно, а также их средние квадратичные ошибки σ_α и σ_δ в угловых секундах по наблюдениям в МАОС. Как видно из табл. 2.18,

средняя по всем кадрам ошибка астрометрической редукии не превышает $0.04''$ и $0.09''$ для прямого восхождения α и склонения δ , соответственно.

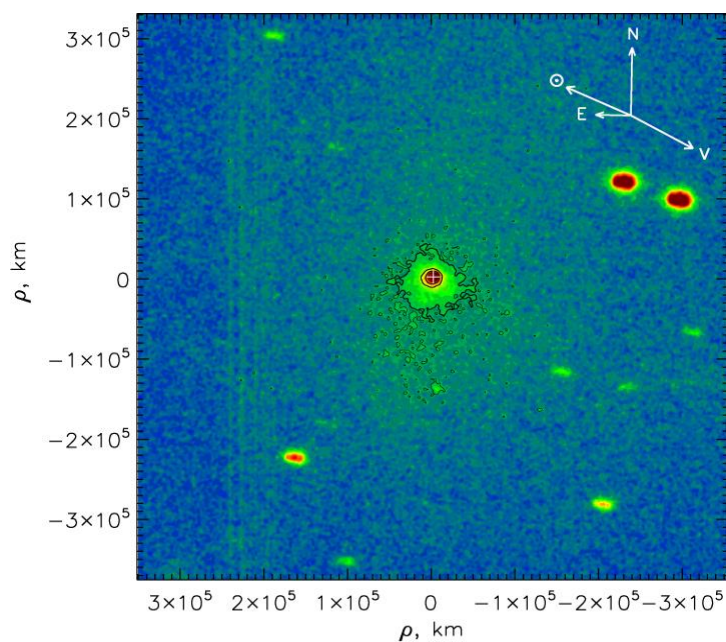


Рис. 2.10. Суммарное изображение кометы 29Р в фильтре R , полученное 30 июля 2017 г., телескоп Цейсс-1000 МАОС, экспозиция 1800 сек.

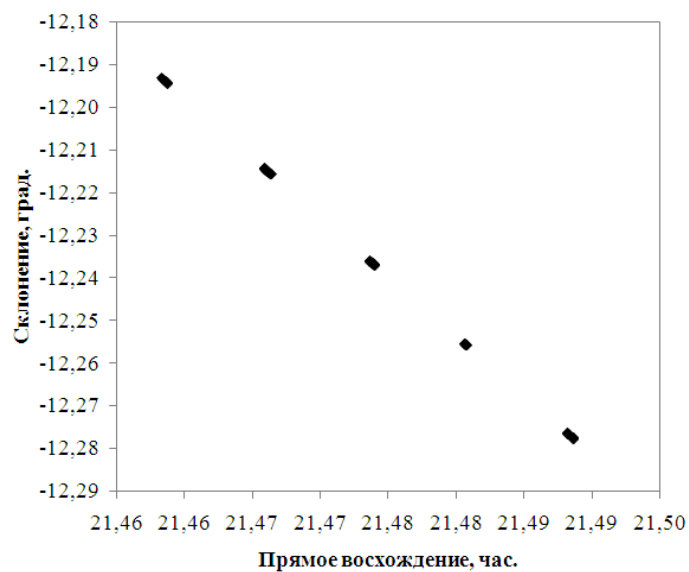


Рис. 2.11. Видимая траектория кометы 29Р/Швассмана-Вахмана 1 по наблюдениям в обсерватории Санглох.

Таблица 2.17. Экваториальные координаты и видимые звездные величины в разных фильтрах кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 по наблюдениям в МАОС в 2017 г.

№	Дата, 2017	Момент наблюдений (UT)	α	δ	m (зв.вел.)
1	28 июля	20 ^h 00 ^m 10 ^s .94	21 ^h 29 ^m 19 ^s .18	-13°43'20".40	15.9
2	28 июля	20 04 43.10	21 29 19.09	-13 43 20.60	15.9
3	28 июля	20 06 12.96	21 29 19.06	-13 43 20.70	16.0
4	29 июля	21 09 57.02	21 28 50.80	-13 44 38.80	16.7
5	29 июля	21 14 49.92	21 28 50.71	-13 44 39.20	16.0
6	29 июля	21 16 01.63	21 28 50.68	-13 44 39.20	15.6
7	30 июля	18 39 44.64	21 28 26.45	-13 45 46.80	15.7
8	30 июля	18 46 03.93	21 28 26.32	-13 45 46.90	15.6
9	30 июля	18 47 15.64	21 28 26.30	-13 45 47.00	15.8
10	31 июля	18 51 27.93	21 27 58.75	-13 47 03.90	16.3
11	31 июля	18 53 59.13	21 27 58.72	-13 47 04.00	16.3
12	31 июля	19 01 30.14	21 27 58.56	-13 47 04.30	16.2
13	1 августа	18 21 43.77	21 27 31.70	-13 48 19.80	16.8
14	1 августа	18 32 40.41	21 27 31.48	-13 48 20.40	16.3
15	1 августа	18 33 51.26	21 27 31.47	-13 48 20.40	15.9

Таблица 2.18. Точность наблюдений кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 в обсерватории Санглож

Дата	$(O-C)_\alpha''$	σ_α''	$(O-C)_\delta''$	σ_δ''
28.07. 2017	-0.023	0.018	0.073	0.038
29.07. 2017	-0.062	0.026	0.071	0.015
30.07. 2017	-0.063	0.025	0.086	0.019
31.07. 2017	-0.080	0.044	0.093	0.034
01.08. 2017	-0.056	0.016	0.035	0.019

На основе найденных из наблюдений координат с помощью ПП ЭПОС-9 [30] вычислена орбита кометы. Результаты представлены в табл. 2.19, где для сравнения также дана орбита, найденная по наблюдениям, собранным в Международном центре малых планет (MPC) [145], и приведены χ - величины разности между вычисленной нами орбитой и орбитой MPC. В табл. 2.19 наряду с обычными элементами также даны T – время прохождения перигелия в юлианских днях (JD), эпоха, на которую орбита вычислена, n – среднее движение кометы, P – период обращения, σ – среднеквадратичная ошибка в угловых секундах, χ – разности между элементами вычисленной нами орбиты и орбитой MPC. Как видно, по наблюдениям в МАОС получена орбита, согласующаяся с орбитой MPC.

Таблица 2.19. Первоначальная орбита кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1, полученная по наблюдениям обсерватории Сангдох, и орбита MPC (J2000.0)

Элементы орбиты	МАОС [данная работа]	[145]	χ
Кол-во положений, использованное для вычисления орбиты	300	20553	-
T (JD)	2458564.1	2458567.2	-
<i>Эпоха</i> (JD)	2457820.5	2457600.5	-
e	0.0417716 ± 0.00023	0.041644	0.0001274
a , а.е.	6.016222 ± 0.00014	6.015152	0.00107031
q , а.е.	5.764914 ± 0.00010	5.764655	0.00025873
i , град.	9.374445 ± 0.00060	9.376580	-0.00214
ω , град.	48.758930 ± 0.00021	48.983320	-0.22439
Ω , град.	312.409930 ± 0.00010	312.409270	0.00066
n , град./сут.	0.066792 ± 0.00011	0.066808	-0.00000178
σ''	0.288	0.600	

Анализ результатов астрометрии показывает достаточно хорошую точность определения координат из наблюдений в МАОС, отличающихся от

данных мирового мониторинга в пределах ошибок измерений, об этом свидетельствуют и элементы орбиты, вычисленные по найденным координатам.

2.3.2. Исследование физических параметров кометы

29P/Швассмана-Вахмана 1

Фотометрическая обработка выполнена по стандартной процедуре. Для определения видимых звездных величин кометы использовались звезды сравнения из каталога APASS, для которых блеск определен с точностью равной 0.03^m [146]. Кривые блеска 29P представлены на рис.2.12, где по оси ординат отложены видимые звездные величины m в фильтрах $BVRI$ и по оси абсцисс - даты наблюдений в юлианских днях. Средние значения видимых звездных величин объекта, полученные в разных фильтрах, для каждой ночи наблюдений даны в табл. 2.20. Отметим, что видимые звездные величины определены без учета данных стандартной фотометрической системы. Это связано с тем, что пока не выполнена калибровка системы телескоп - камера - фильтры, и, следовательно, нет привязки к фотометрическим стандартам.

Таблица 2.20. Видимые звездные величины* m кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 по наблюдениям в МАОС

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

* оценка звездной величины в апертурном радиусе (размер апертуры 3 угловых сек., что соответствует ~ 10518 км).

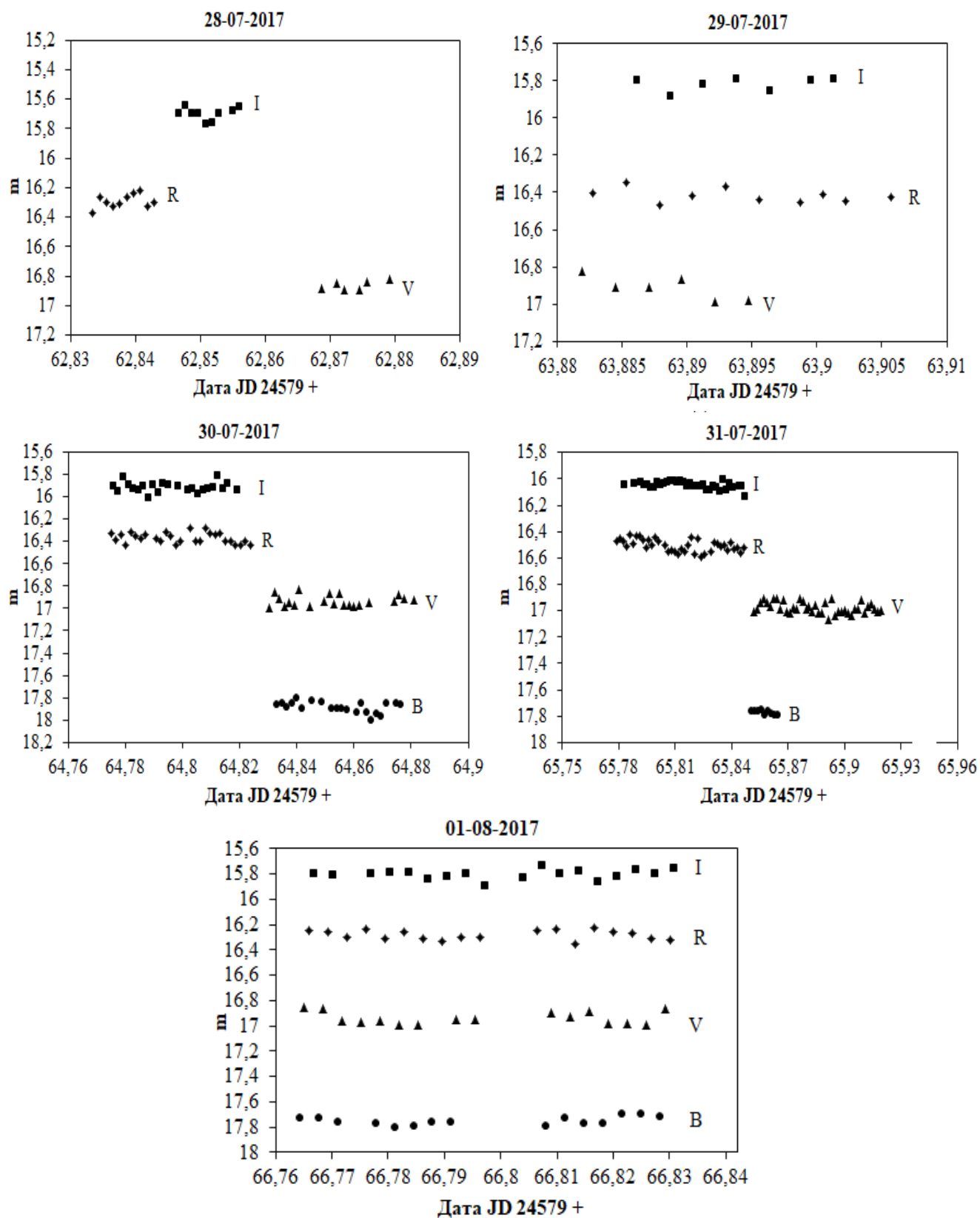


Рис.2.12. Видимые звездные величины 29P/Швассмана-Вахмана 1 в фильтрах $BVRI$ по наблюдениям в МАОС с 28 июля по 1 августа 2017 г.

Видимые звездные величины m_a конвертировались в абсолютные звездные величины ядра кометы $m_a(1,1,0)$ с использованием эмпирического уравнения (1.9). Найденные таким путем абсолютные звездные величины кометы в фильтрах $BVRI$ (средние значения за пять ночей) приведены в табл. 2.21. Зависимость абсолютных величин кометы, обозначенных на графике H , от даты наблюдений (в юлианских днях) в МАОС приведена на рис. 2.13. Как видно, в период мониторинга абсолютные звездные величины кометы практически были постоянными.

Таблица 2.21. Абсолютные звездные величины $m_a(1,1,0)$ кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 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

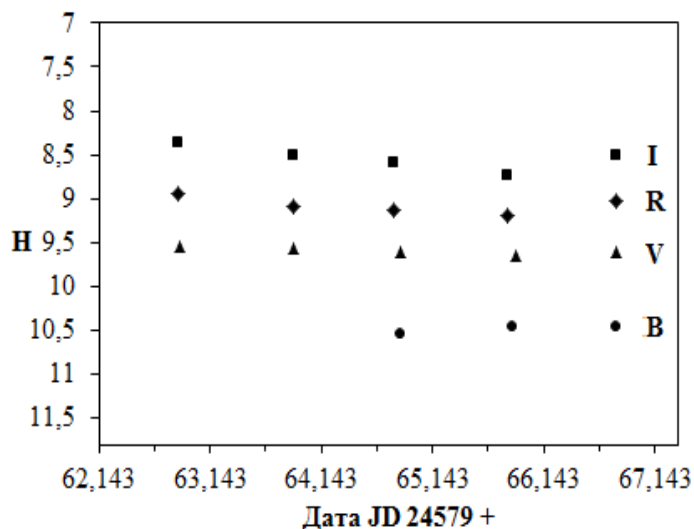


Рис.2.13. Абсолютные звездные величины H (средние значения) кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 в фильтрах $BVRI$ по наблюдениям в МАОС.

Инструментальные 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.2.22. Как видно, показатели цвета кометы 29P по наблюдениям в МАОС соответствуют средним 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/Швассмана-Вахмана 1 непрерывно пополняется мелкой пылью, отделяемой с поверхности ядра [142]. Более того, систематичность этого процесса подтверждают наблюдения космического телескопа Spitzer, с помощью которого зарегистрированы джеты в период отсутствия вспышек кометы [147].

Таблица 2.22. Инструментальные показатели цвета кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 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 [23]		Солнце
	28.07	29.07	30.07	31.07	01.08	[22]	[23]	[23]	[23]	Active	Inactive	[24]
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 [23], 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/Швассмана-Вахмана 1 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. 2.23.

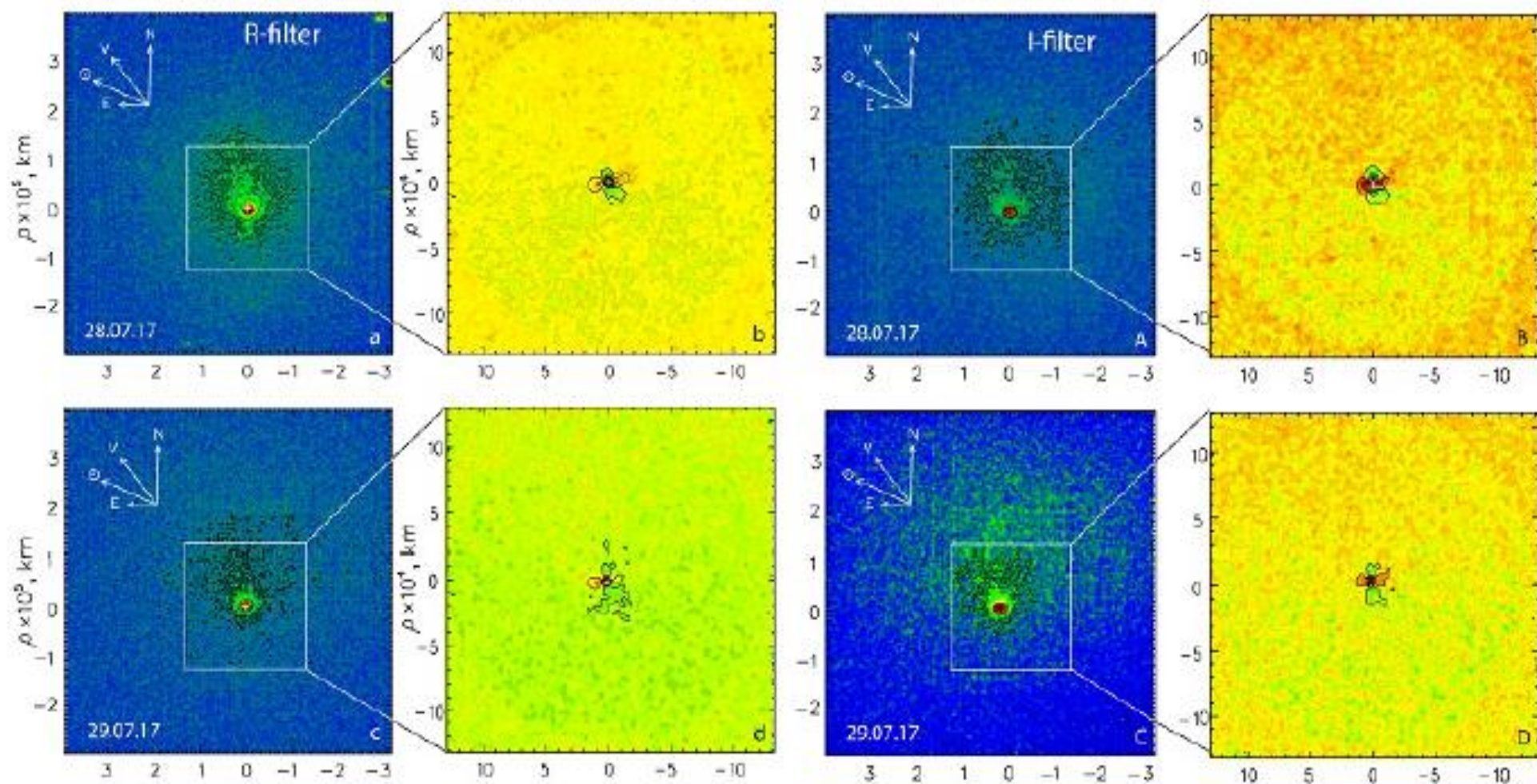
Как было отмечено, имеется оценка радиуса ядра в пределах от 21 до 52 км в предположении $A=0.04$ [21]. Согласно [135] оценка радиуса ядра составляет 20 км при $A=0.13$. По нашим измерениям, оценка диаметра заключена в пределах 43.3-45.7 км при $A=0.13$ и 86.7-91.4 с $A=0.033$, что вполне соответствует имеющимся данным. Для уточнения размера необходимо продолжить наблюдения кометы.

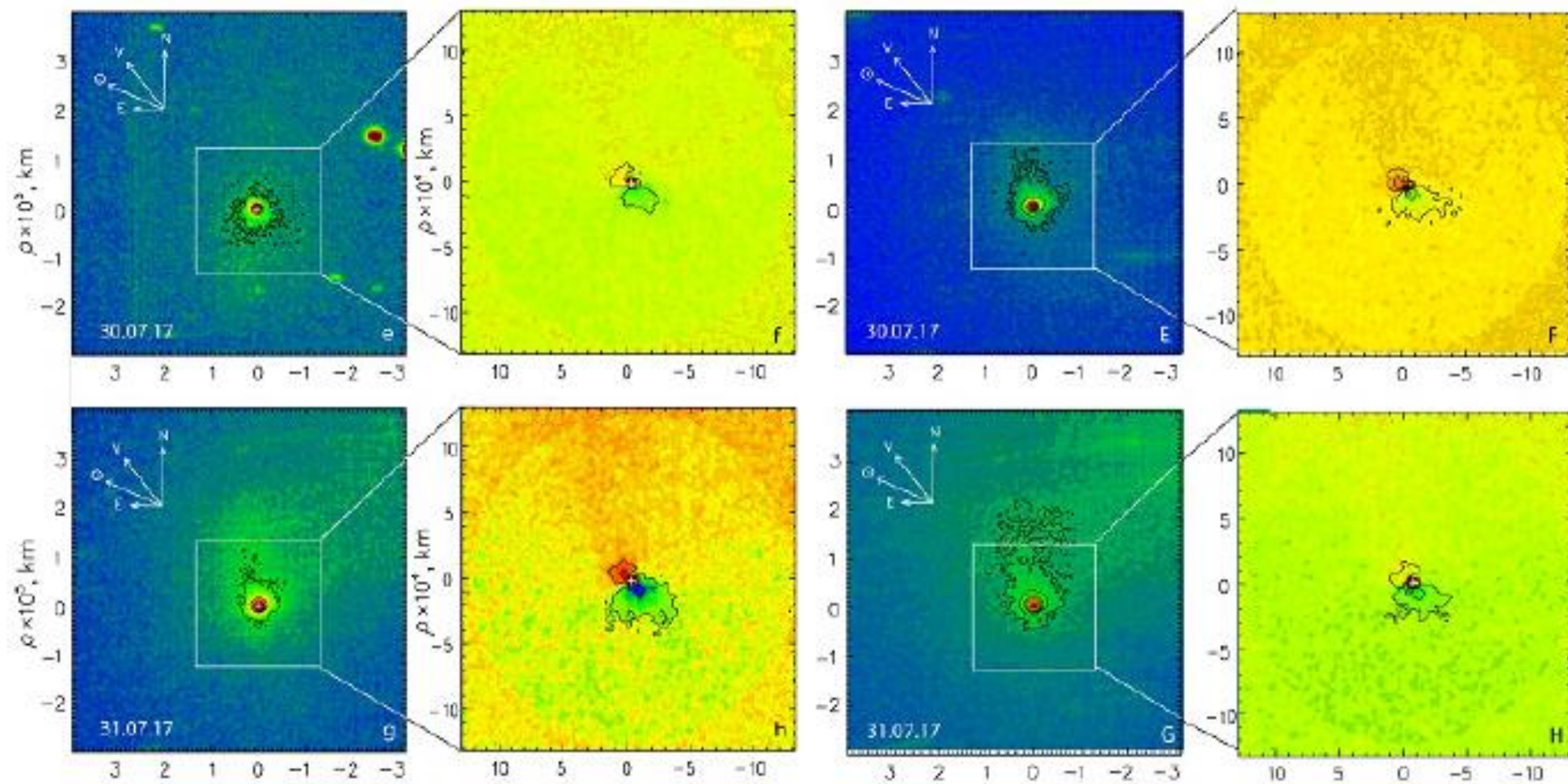
Таблица 2.23. Оценка размера ядра кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 по наблюдениям в МАОС

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, 2017	5.829	4.842	2.583	16.88±0.04	9.54±0.04	45.87±0.08	91.05±0.08
29.88, 2017	5.828	4.838	2.403	16.91±0.05	9.57±0.05	45.08±0.08	85.47±0.08
30.77, 2017	5.828	4.834	2.223	16.92±0.05	9.60±0.05	44.55±0.08	86.38±0.08
31.85, 2017	5.828	4.831	2.042	16.97±0.04	9.65±0.03	43.52±0.08	86.39±0.08
01.76, 2017	5.828	4.828	1.860	16.92±0.04	9.61±0.04	44.27±0.08	87.86±0.08

2.3.3. Морфология комы кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1

Как было отмечено, комета 29P/Швассмана-Вахмана 1 проявляет вспышечную активность с большим количеством структур в коме [140-152]. 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 [8]. На рис. 2.14 показаны первоначальные и обработанные с использованием цифрового фильтра изображения. 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. 2.14, 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/Швассмана-Вахмана 1 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 расстояний более 5 а.е. уже сообщалось в опубликованных работах [140,141]. 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 еще предстоит выяснить.





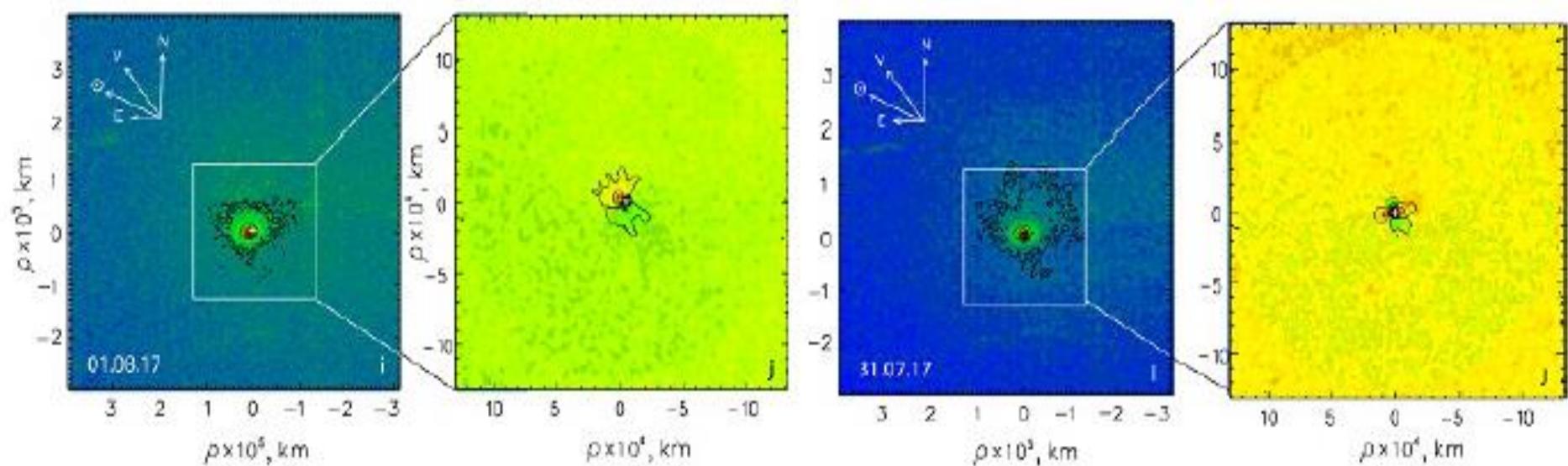


Рис. 2.14. Изображения кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 в R и I фильтрах, полученные 28 июля и 1 августа 2017 года. Кадры а, с, е, g, i и А, С, Е, G, I показывают прямые изображения 29P в относительной интенсивности в R и I фильтрах, соответственно. Кадры b, d, f, h, j и В, D, F, H, J представляют интенсивность изображений, к которым был применен алгоритм Ларсона-Секанины [8, 153]. Северное (N), восточное (E) и солнечное ($\odot$) направления, а также направление вектора скорости (V) указаны на каждом прямом кадре.

Выводы по главе II

Внезапная вспышка кометы в октябре 2007 г. связана с выбросом вещества, хорошо отражающего солнечный свет. Облако вещества, образовавшееся при делении ядра кометы, отличается уникальной сферической симметрией, объяснить природу которого чрезвычайно затруднительно. Скорость разлета фрагментов ядра после его деления является серьезным индикатором причины деления. При распаде ядра под действием приливных сил Солнца и планет скорость разлета фрагментов ядра обычно небольшая (метры в секунду или меньше). По 273 наблюдениям кометы 17P/Холмса, выполненным в Таджикистане подтверждено деление ядра кометы. Время распада ядра $24^{\text{d}}.1 \pm 1^{\text{d}}.1$ октября 2007 г. (UT). Вспышка яркости кометы и деление её ядра не связаны с активными процессами на Солнце. Полученная оценка скорость разлета фрагмента ядра $V = 107 \pm 35$ м/с дает основание предположить, что наиболее вероятной причиной деления ядра кометы Холмса и, как следствие, вспышка яркости, является столкновение ядра с другим космическим телом.

В двух обсерваториях Института астрофизики АН РТ проведены квазисинхронные наблюдения кометы 41P/Туттля-Джакобини-Кресака во время сближения с Землей в апреле 2017 г. В результате астрометрической обработки наблюдений определены координаты объекта, данные по геоцентрической траектории кометы по наблюдениям МАОС и ГисАО хорошо согласуются между собой. Орбита, вычисленная по данным МАОС и ГисАО близка к орбите кометы по данным MPC. Видимые звездные величины, найденные из астрометрии, также соответствует данным других наблюдений.

В результате фотометрической обработки наблюдений найден видимые звездные величины кометы в фильтрах BVRI и построены кривые блеска по наблюдениям пяти ночей. Определены абсолютные звездные величины кометы в фильтрах BVRI, их зависимость от времени свидетельствует об отсутствии нерегулярностей в блеске кометы в период наблюдений. Показатель цвета

соответствует диапазону значений для активных комет семейства Юпитера и показывает, что на данном расстоянии от Солнца в коме кометы все еще преобладает пылевая компонента, включающая силикаты, углистые и органические конгломераты, более красные по отражательной способности. Значения диаметра ядра по нашим наблюдениям близки между собой, но отличаются от имеющейся в литературе оценки. Для уточнения размера кометы нужны новые наблюдения. В результате астрометрической обработки наблюдений кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 в обсерватории Санглох определены координаты, геоцентрическая траектория и орбита кометы, которые согласуются с данными MPC.

ГЛАВА III. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ, НА ОСНОВЕ ИХ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

3.1. Результаты квазисинхронных наблюдений потенциально опасного астероида 2014 JO25

Астероид, сближающийся с Землей, 2014JO25 был открыт A. D. Grauer в мае 2014 г. в обсерватории Mt. Lemmon, Аризона, США, в рамках программы Mt. Lemmon Survey. По первым наблюдениям была определена его орбита, и стало очевидным, что астероид может сближаться с Землей до расстояний, меньших 7.5 млн. км. По данным космических наблюдений миссии NEOWISE в 2014 г. оценка диаметра и оптическое альbedo астероида составляют 0.65 км и 0.25, соответственно, что указывает на то, что объект является достаточно ярким [28, 154]. Согласно базе данных AC3 NEODYS [12], диаметр астероида, вычисленный в предположении значений его альbedo 0.04-0.20, составляет 0.83-1.86 км и объект такого размера считается крупным. Абсолютная яркость 2014 JO25 равна $H=17.8$ звездных величин [29, 155]. Астероид перемещается в межпланетном пространстве с чрезвычайно высокой скоростью, необычной для астероидов, составляющей более 33 км/с. Спектральный класс пока не известен, период вращения по предварительным оценкам может составлять от 4.5 до 5.6 ч [28, 155].

Из-за тесных сближений с Землей и размера астероид был классифицирован как потенциально опасный (ПОА) для Земли [155].

В апреле 2017 г. произошел очередной близкий подход астероида к Земле. В ночь с 19 на 20 апреля астероид пролетел мимо Земли на расстоянии менее 0.0118 а.е. (1.8 млн. км). В момент наибольшего сближения с Землей астероид был очень ярким, и его перемещение среди звезд можно было наблюдать даже в бинокль.

Следующее сближение астероида с Землей на расстоянии 0.16 а.е. произойдет в 2020 г., и на расстоянии 0.04 а.е. – в 2091 г. [12]. Дистанция, на которой произошло сближение астероида с Землей в 2017 г., является наименьшей, по крайней мере, за последние 400 лет, и в будущем такие тесные сближения не известны до 2500 г. Наблюдаются также регулярные близкие подходы астероида к Венере и Меркурию.

В апреле 2017 г. выполнены радионаблюдения астероида в обсерваториях Голдстоун и Аресибо, США, где расположены крупнейшие в мире радиотелескопы. По данным этих наблюдений получены первые радиолокационные изображения ПОА 2014 JO25. Найдено, что диаметр объекта составляет приблизительно 1 км, и он совершает полный оборот за 4.5 часов, но самое примечательное, оказалось, что астероид является двойным и имеет геометрическую фигуру схожую с ядром кометы 67P/Чурюмова-Герасименко, вследствие этого астероид был отнесен к контактно-двойным объектам [156].

Элементы орбиты ПОА 2014 JO25, принадлежащего группе Аполлона, приведены в табл. 3.1, где a – большая полуось, e – эксцентриситет, q , Q – перигелийное и афелийное расстояния, i – наклонение орбиты, ω – аргумент перигелия, Ω – долгота восходящего узла, T_j – критерий Тиссерана [155]. Период обращения астероида равен 2.97 лет. Орбита астероида является сильно вытянутой ($e=0.89$), имеет наклонение к эклиптике 25 град., перигелий равен 0.24 а.е. (дата прохождения 10 марта 2017 г.) и афелий – 3.9 а.е., значение критерия Тиссерана для него соответствует пограничной величине между кометными и астероидными орбитами.

Таблица 3.1. Элементы орбиты астероида 2014 JO25 (J2000.0)

Объект	Эпоха	a , а.е.	e	q , а.е.	Q , а.е.	i , град.	ω , град.	Ω , град.	T_j
2014JO25	4.09.17	2.068	0.885	0.237	3.900	25.270	49.571	30.653	3.05

В апреле 2017 г. астероид пролетел от Земли настолько близко, что при одновременных наблюдениях с разных обсерваторий, расположенных далеко друг от друга, можно было методами триангуляции определить расстояние до астероида и его орбиту с хорошей точностью. Тем самым из астрометрических наблюдений получаются не только координаты объекта на небесной сфере, но и расстояние до него, и, следовательно, сразу определяется его положение и орбита. Это дает новые возможности для построения его траектории при пролете вблизи Земли и определения изменений его орбиты в результате пролета. Все эти сведения очень важны для поиска и разработки путей предотвращения и смягчения последствий возможных столкновений астероидов с Землей.

В апреле 2017 г. Главной астрономической обсерваторией (Пулковской) РАН была организована кампания по базисным наблюдениям астероида 2014 JO25 в период его сближения с Землей, целью которой явилась отработка методики построения достаточно точных орбит астероидов по их кратковременным (1–2 часа) наблюдениям, произведённым одновременно из разных обсерваторий. Такие наблюдения позволяют методом триангуляции определять мгновенные прямоугольные координаты и скорости объекта в гелиоцентрической системе координат, что даёт возможность строить точную орбиту по очень короткой дуге траектории [157].

Наблюдения астероида в рамках кампании продолжались с 18 по 25 апреля 2017 г. и в них приняли участие 6 обсерваторий: Уссурийской астрофизической обсерватории ДВО РАН, Гиссарской астрономической обсерватории (ГисАО) и Международной астрономической обсерватории Санглох (МАОС) Института астрофизики Академии наук Республики Таджикистан (ИА АН РТ), Звенигородской обсерватории Института астрономии Российской академии наук (ИНАСАН), Главной (Пулковской)

обсерватории РАН (ГАО РАН) и Кисловодской горной астрономической станции ГАО РАН.

В табл. 3.2 приведены некоторые характеристики обсерваторий и инструментов, участвовавших в наблюдениях [157].

Для обеспечения одновременности наблюдений всех обсерваторий, широко расположенных по долготе, было предложено наблюдать астероид каждую ночь в единый промежуток времени продолжительностью в один час. В остальное время рекомендовалось продолжать ряды наблюдений астероида, насколько это позволяло наблюдательное расписание каждой обсерватории. Для попутного получения цветовых характеристик астероида было предложено часть наблюдений выполнять со сменой светофильтров широкополосной международной фотометрической системы *BVRI*, которыми оборудованы все инструменты.

Таблица 3.2. Обсерватории и инструменты, участвовавшие в кампании базисных наблюдений астероида 2014 JO25 в 2017 г.

Пункт Код МРС	Координаты	Телескоп	Апертура Фокус (мм)	Масштаб ("/pix)
Уссурийск С15	+43°42'132°10'	GAS-250	250 748	3.3
Санглох 192	+38°16'69°13'	Цейсс-1000	1000 13000	0.3
Гиссар 190	+38°29'68°41'	АЗТ-8	700 2820	1.8
Кисловодск С20	+43°45'42°40'	МТМ- 500М	500 4100	1.2
Звенигород 102	+55°42'36°46'	Цейсс-600	600 7200	0.5
Пулково 084	+59°46' 30°20'	3А-320М	320 3200	1.8

Видимая скорость движения наблюдавшегося астероида вблизи момента его наибольшего сближения с Землёй достигала сотен угловых секунд в минуту, что сильно затрудняло как наблюдения, так и обработку.

В течение наблюдений было получено более 10 тыс. ПЗС-кадров (включая калибровочные), которые были переданы в Пулковскую обсерваторию, где была произведена их обработка.

Обработка наблюдений, а именно, калибровка кадров, выделение изображений звёзд и астероида и отождествление звёзд с заданными каталогами выполнялись с помощью программного пакета АПЕКС-II [9]. Астрометрическая редукция выполняется методами шести или восьми постоянных (в зависимости от числа отождествлённых звёзд); в качестве опорного астрометрического каталога использовался каталог UCAC-4. Фотометрическая редукция осуществлялась с опорой на инфракрасный обзор 2MASS; блеск звёзд в полосах *BVRI* вычислялся из величин *J* и *K*, приведённых в каталоге 2MASS, в соответствии с коэффициентами трансформации, приведёнными в работе [158]. Величины средней точности определения экваториальных координат астероида 2014 JO25 обсерваториями, участвовавшими в наблюдательной кампании, приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Средняя точность астрометрических наблюдений

Обсерватория	σ_{α}''	σ_{δ}''
Уссурийск (C15)	0.343	0.230
Гиссар (190)	0.124	0.293
Санглох (193)	0.202	0.323
Кисловодск (C20)	0.448	0.791
Звенигород (102)	0.406	0.617
Пулково (084)	0.410	0.632

По ПЗС-наблюдениям астероида можно получить его топоцентрические прямые восхождения и склонения, основанные на точных координатах опорных звезд из современных звездных каталогов. Если иметь синхронные наблюдения объекта на двух обсерваториях с известными координатами, то из комбинации упомянутых величин можно получить прямоугольные гелиоцентрические координаты объекта на этот момент [159].

Поскольку синхронизировать наблюдения практически невозможно, то предложен следующий подход. На каждой обсерватории получаем плотный ряд наблюдений в интервале времени общей видимости объекта. При достаточной точности наблюдений величины прямого восхождения и склонения на отмеченном интервале времени можно аппроксимировать полиномами невысокой степени, чтобы затем получить нужные величины на любой момент времени внутри выбранного интервала.

Выберем некоторый фиксированный интервал (например, 5 минут) и вычислим с помощью упомянутых полиномов [159] величины экваториальных координат объекта. Далее, получим векторы прямоугольных гелиоцентрических координат и скоростей на средний из двух выбранных моментов. Если проделать эту процедуру с шагом по времени 1–2 минуты в границах упомянутого общего интервала видимости, то можно определить множество орбит. Далее, вычисляя величину среднего квадратичного отклонения (корень квадратный из суммы квадратов невязок по прямому восхождению и склонению, деленной на число наблюдений), обозначенную RMS, можно проверить, насколько хорошо каждый набор элементов воспроизводит наблюдения. Тот набор, который дает минимальную величину внутри интервала, принимается за искомый. Далее можно в известных пределах варьировать величину интервала времени между двумя наблюдениями, и здесь искать минимум [157].

База наблюдений должна обеспечивать достаточно большой параллактический угол (более нескольких минут дуги, лучше 10-15). Чем точнее наблюдения, тем меньшая величина этого угла допускается.

Интервал времени общей видимости должен быть достаточно большой (порядка часа), а точность наблюдений на двух обсерваториях должна быть сравнима. При невыполнении этих условий иногда даже очень точные наблюдения не могут быть использованы.

Приведем предварительные результаты определения орбиты астероида с использованием данных квазисинхронных наблюдений [157]. В качестве образца для сравнения мы использовали орбиту, опубликованную на сайте Международного центра малых планет (MPC) и построенную по более чем полутора тысячам наблюдений, выполненных на различных обсерваториях мира с 2011 по 2017 гг. Её элементы указаны в первой строке табл.3.4.

Таблица 3.4. Элементы орбиты астероида 2014 JO25 на эпоху JD2458000.5, опубликованные на сайте MPC, а также полученные на основе базисных наблюдений двух пар обсерваторий

	M	ω , град.	Ω , град.	i , град.	e	a , а.е.
MPC	58.7888	49.5713	30.6528	25.2699	0.885433	2.0682656
C20 – C15	59.1440	49.8111	30.6393	25.5186	0.883973	2.0607208
190 – C15	63.7368	59.1654	30.6582	24.6433	0.836446	1.9833417

Как видно из табл. 3.4, лучшие результаты получены из квазисинхронных наблюдений астероида 2014 JO25 обсерваторий C20 (Горная астрономическая станция ГАО РАН, Кисловодск) и C15 (Уссурийская астрофизическая обсерватория ДВО РАН). Длина базы составила 6491 км, а максимальный параллактический угол - 11'.8. Вычисленные по этим наблюдениям элементы

орбиты приведены во второй строке табл. 3.4. Результат для пары обсерваторий С15 (Уссурийск) – 190 (Гиссар) с длиной базы 5082 км и параллактическим углом 8'.6, приведённый в третьей строке табл. 3.4, получился с большими ошибками.

Таким образом, можно заключить, что для вновь открытого объекта этот метод при существующих точностях астрометрических измерений может дать хорошую первоначальную орбиту за короткий (от 1 часа) промежуток времени наблюдений при величине параллактического угла от 10' и более. Моделирование процесса базисных наблюдений показало, что улучшение точности астрометрических наблюдений примерно на порядок позволит уменьшить величину необходимого угла примерно до трёх угловых минут [157].

3.1.1. Исследование динамических свойств астероида 2014 JO25

Как было отмечено, Институт астрофизики АН РТ поддержал кампанию по синхронному мониторингу, координатором которой выступила ГАО РАН Пулково. С 18 по 25 апреля 2017 г. на телескопах Цейсс-1000 в Международной астрономической обсерватории Санглох (МАОС) и АЗТ-8 Гиссарской астрономической обсерватории (ГисАО) выполнены наблюдения астероида 2014 JO25 и получено несколько сотен изображений. Часть из них была использована при обработке в рамках кампании квазисинхронных наблюдений этого объекта пятью обсерваториями в России и двумя обсерваториями в Таджикистане [160]. Но весь набор наблюдений в Таджикистане сам по себе представляет научный интерес. В связи с этим рассмотрим результаты независимой обработки этих наблюдений для исследования динамических и физических свойств астероида. В данном параграфе представлены результаты

определения координат и орбиты астероида 2014 JO25 по данным наблюдений в МАОС и ГисАО.

Напомним, что регистрация объекта выполнялась с помощью ПЗС–камер FLI 16803 на телескопе Цейсс-1000 и FLI 9000 на - АЗТ-8 с использованием широкополосных фотометрических фильтров системы Джонсона-Козинса – BVRI, при этом экспозиции составляли от 2 до 15 секунд. Масштаб матрицы с учетом значения бининга 2х2 для фотометрии составляет 0.36"/пк и 1.8"/пк для телескопов Цейсс-1000 и АЗТ-8, соответственно. Первичная обработка кадров выполнялась по стандартной процедуре с использованием кадров «Dark», «Flat» и «Bias». Во время наблюдений в МАОС было получено 2730 изображения объекта за 19-25 апреля и в ГисАО - 1194 снимков за 18-25 апреля. Сводка наблюдений в обсерваториях приведена в табл. 3.5. Изображения астероида 2014 JO25, полученные во время наблюдений показаны на рис. 3.1.

Таблица 3.5. Сводка наблюдений астероида 2014 JO25 в МАОС и ГисАО

Дата	r , а.е.	Δ , а.е.	ph , град.	$N \times$ Фильтр		t , с
				МАОС, Цейсс-1000	ГисАО, АЗТ-8	
18.04.2017	0.980	0.032	139.8	-	70xR, 30xI	2-15
19.04.2017	0.998	0.015	115.6	138xB, 349xV, 136xR, 112xI	30xB, 30xV, 461xR	2-15
22.04.2017	1.050	0.050	23.9	78xB, 232xV, 213xR, 76xI	30xB, 35xV, 220xR, 35xI	2-15
23.04.2017	1.068	0.069	24.3	123xB, 363xV, 158xR, 116xI	20xB, 50xV, 20xR, 20xI	2-15
24.04.2017	1.085	0.088	24.9	-	30xB, 80xV, 30xR, 30xI	2-15
25.04.2017	1.102	0.107	25.5	111xB, 327xV, 91xR, 107xI	15xB, 48xV, 15xR, 15xI	2-15

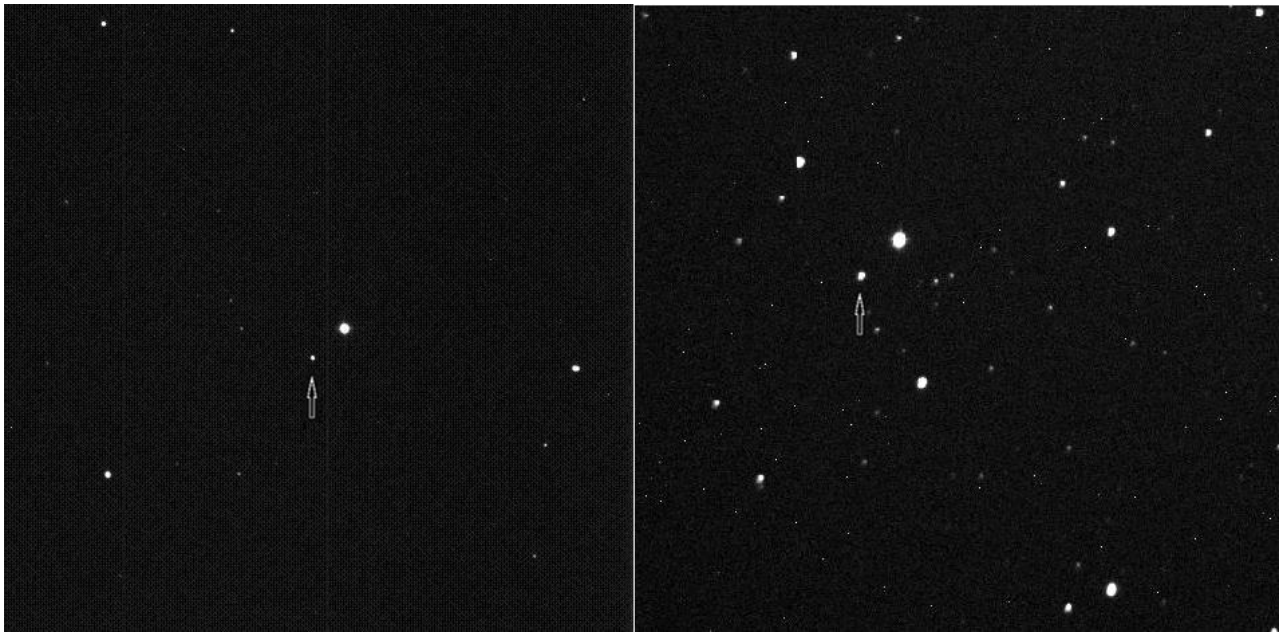


Рис.3.1. Астероид 2014 JO25, 25 апреля 2017 г., экспозиция 10 сек: Цейсс-1000
 МАОС (слева) и АЗТ-8 ГисАО.

Астрометрическая обработка наблюдений в МАОС и ГисАО была выполнена с помощью программного пакета (ПП) АПЕКС-II [9]. В качестве опорного использован астрометрический каталог UCAC5, в котором астрометрическая точность координат звезд не превышает 0.05". Средняя по всем кадрам ошибка астрометрической редукции в обоях обсерваториях не превышает 0.7" и 0.9" для прямого восхождения α и склонения δ , соответственно.

Некоторые экваториальные координаты 2014 JO25, найденные в результате астрометрической обработки наблюдений в МАОС и ГисАО, приведены в табл. 3.6. и 3.7

Таблица 3.6. Экваториальные координаты астероида 2014 JO25
по наблюдениям в ГисАО

№	Дата, 2017 г.	Момент наблюдений (UT)	α	δ	m (зв.вел.)
1	18 апреля	20 ^h 50 ^m 32.3 ^s	22 ^h 36 ^m 54.78 ^s	+55° 20' 22.2"	14.3
2	18 апреля	20 51 04.3	22 36 51.08	+55 21 08.9	14.8
3	18 апреля	20 51 36.2	22 36 48.25	+55 21 59.6	14.9
4	18 апреля	20 52 08.2	22 36 42.36	+55 22 49.4	14.5
5	19 апреля	17 34 42.8	14 00 16.19	+49 46 19.3	10.3
6	19 апреля	17 34 54.9	14 00 13.88	+49 46 15.6	10.4
7	19 апреля	17 35 07.0	14 00 11.58	+49 46 12.4	10.5
8	19 апреля	17 35 19.1	14 00 10.39	+49 46 10.6	10.4
9	22 апреля	18 39 49.8	12 20 39.76	-06 00 51.1	12.7
10	22 апреля	18 40 01.9	12 20 40.00	-06 00 50.5	13.0
11	22 апреля	18 40 17.8	12 20 39.85	-06 00 52.4	12.9
12	22 апреля	18 40 26.9	12 20 39.54	-06 00 54.5	12.8
13	23 апреля	18 09 05.1	12 17 49.94	-08 17 36.6	13.1
14	23 апреля	18 09 17.2	12 17 49.89	-08 17 36.4	12.2
15	23 апреля	18 09 29.3	12 17 49.86	-08 17 36.1	13.7
16	23 апреля	18 09 40.1	12 17 49.85	-08 17 35.8	13.1
17	24 апреля	17 35 56.2	12 16 06.95	-09 38 08.6	14.2
18	24 апреля	17 36 08.3	12 16 06.97	-09 38 07.9	14.3
19	24 апреля	17 36 20.4	12 16 06.98	-09 38 07.7	14.4
20	24 апреля	17 36 32.5	12 16 07.01	-09 38 08.7	14.1
21	25 апреля	17 22 15.4	12 15 02.32	-10 49 27.5	14.2
22	25 апреля	17 22 37.9	12 15 02.34	-10 49 27.7	14.5

Таблица 3.7. Экваториальные координаты астероида 2014JO25 по наблюдениям
в МАОС

№	Дата, 2017 г.	Момент наблюдений (UT)	α	δ	m (зв.вел.)
1	19 апреля	20 ^h 10 ^m 27.8 ^s	13 ^h 37 ^m 29.28 ^s	+42° 32' 33.0"	10.3
2	19 апреля	20 16 47.1	13 36 20.54	+41 50 32.3	10.4
3	19 апреля	20 18 30.8	13 34 29.03	+41 55 24.9	10.5
4	19 апреля	20 20 15.3	13 35 13.01	+41 33 24.1	10.4
5	19 апреля	20 21 59.0	13 35 08.08	+41 50 35.5	10.8
6	22 апреля	19 41 47.6	12 20 21.54	-06 02 26.1	12.7
7	22 апреля	19 42 00.5	12 20 30.66	-06 16 26.5	13.0
8	22 апреля	19 42 15.2	12 20 52.67	-06 04 58.3	12.9
9	22 апреля	19 42 29.0	12 20 25.46	-06 12 45.3	12.8
10	22 апреля	19 42 41.1	12 20 25.46	-06 12 45.3	12.9
11	22 апреля	19 42 55.0	12 21 08.86	-06 01 34.5	13.0
12	23 апреля	16 21 25.9	12 17 25.52	-08 17 11.0	13.1
13	23 апреля	16 23 57.1	12 18 53.22	-07 51 04.2	12.2
14	23 апреля	16 26 28.3	12 17 20.24	-08 25 22.9	13.2
15	23 апреля	16 28 58.6	12 18 46.85	-08 04 12.2	13.1
16	23 апреля	16 41 33.7	12 17 59.93	-08 23 16.0	13.2
17	23 апреля	16 46 36.1	12 17 36.55	-08 19 17.8	13.7
18	25 апреля	17 15 44.0	12 15 00.34	-10 46 15.5	15.0
19	25 апреля	17 28 19.2	12 14 38.55	-10 47 07.0	14.8
20	25 апреля	17 29 19.8	12 14 38.55	-10 47 07.0	14.8
21	25 апреля	17 36 19.6	12 15 15.21	-10 41 10.6	14.8
22	25 апреля	17 37 19.1	12 14 50.89	-10 29 48.9	14.7

В табл. 3.8 и 3.9 представлены средние значения отклонений $(O-C)_\alpha$ и $(O-C)_\delta$ для координат α и δ , соответственно, а также их средние квадратичные ошибки σ_α и σ_δ по наблюдениям в ГисАО и МАОС. Результаты определения координат астероида по наблюдениям в МАОС приведены на рис. 3.2 (справа), а также траектория объекта по наблюдениям в ГисАО показана на рис. 3.2 (слева), траектория объекта по наблюдениям в ГисАО, МАОС и другим наблюдениям из базы данных [156] показана в центре рис. 3.2. На графиках по оси абсцисс дано прямое восхождение астероида - α и по оси ординат - склонение δ . Как видно, после тесного сближения наблюдается обратное видимое движение объекта.

Таблица 3.8. Средние разности $(O-C)$ и их стандартные отклонения для астероида 2014 JO25 по наблюдениям в ГисАО

Дата	$(O-C)_\alpha''$	σ_α''	$(O-C)_\delta''$	σ_δ''
19.04.2017	-0.610	0.926	-0.235	0.992
22.04.2017	0.147	0.025	-0.105	0.033
23.04.2017	-0.034	0.020	-0.743	0.022
24.04.2017	-0.014	0.026	-0.545	0.039
25.04.2017	-0.144	0.022	-0.342	0.021

Таблица 3.9. Средние разности $(O-C)$ и их стандартные отклонения для астероида 2014 JO25 по наблюдениям в МАОС

Дата	$(O-C)_\alpha''$	σ_α''	$(O-C)_\delta''$	σ_δ''
19.04.2017	-0.977	0.464	0.652	0.250
22.04.2017	0.115	0.038	0.253	0.058
23.04.2017	-0.134	0.222	0.943	0.076
25.04.2017	-0.124	0.106	0.845	0.037

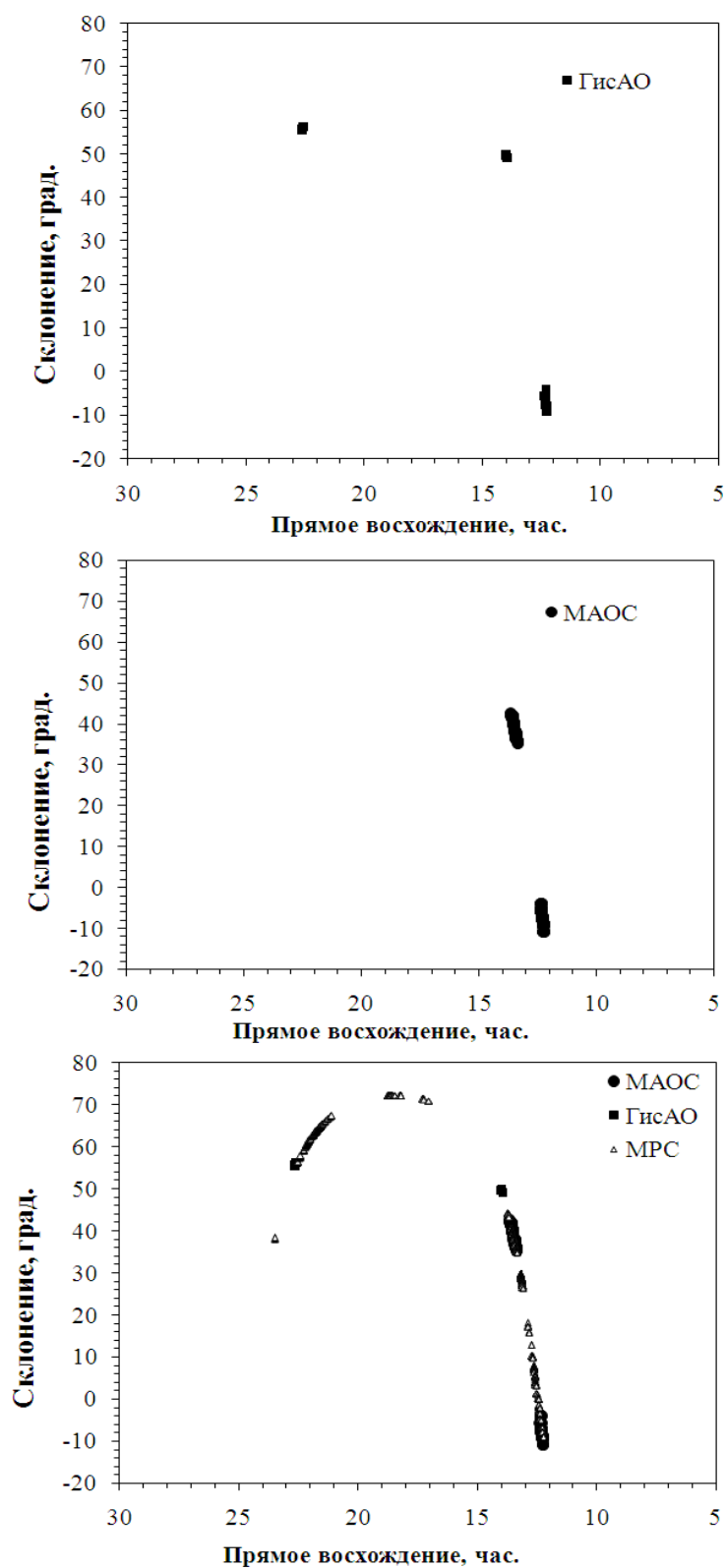


Рис.3.2. Траектория ПОА 2014 JO25 по наблюдениям в Таджикистане и данным других наблюдений.

3.1.2. Определение орбиты астероида 2014 JO25 и ее улучшение

Приведем результаты определения орбиты астероида по данным наблюдений двух обсерваторий Института астрофизики АН Таджикистана, выполненную совместно с коллегами из ГАО РАН.

Для определения орбиты астероида 2014 JO25 астрометрическая обработка наблюдений была выполнена с помощью ПП АПЕКС-II [9]. Определение и улучшение орбиты выполнялось с использованием ПП ЭПОС [30].

Первоначальное определение орбиты

На первом этапе работы мы проверили, можно ли только на основе данных астрометрии произвести первоначальное определение орбиты астероида 2014JO25.

Гиссарская астрономическая обсерватория

Всего было обработано 1847 наблюдений в интервале с 19 по 25 апреля 2017 г. Расстояние до объекта к началу наблюдений было 1.83 млн. км, к концу - 18.35 млн. км. Объект двигался относительно Земли со скоростью более 33 км/с, вследствие чего угловая скорость видимого движения по небесной сфере в первые сутки была особенно велика. Наблюдения были проверены программой «О-С» ПП ЭПОС [30], позволяющей оценивать отклонения измеренных экваториальных координат (О) от вычисленных данных (С). В табл. 3.10 приведены средние ошибки одного наблюдения по прямому восхождению α и склонению δ в угловых секундах (") для отдельных суток, полученные на основе элементов орбиты MPC [155], которая построена по нескольким тысячам наблюдений обсерваторий мира за всё время с открытия астероида 2014 JO25 по 2017 г.

В результате отсева для первоначального определения орбиты были использованы 1380 наблюдений. Для среднего момента наблюдений ГисАО

удалось получить орбиту модифицированным методом Хергета в ПП ЭПОС [30].

Таблица 3.10. Точность наблюдений астероида 2014 JO25 Гиссарской обсерваторией

Апрель 2017 г.	α''	δ''
19	0.904	1.131
22	0.191	0.180
23	0.112	0.108
24	0.110	0.126
25	0.171	0.294

Элементы орбиты M - средняя аномалия, ω - аргумент перигелия, Ω - долгота восходящего узла, i - наклонение, e - эксцентриситет, q - перигелийное расстояние были переведены на эпоху текущего каталога MPC JD2458000.5 (4 сентября 2017 г.). В табл. 3.11 в первой строке приведены элементы орбиты MPC [155], во второй - полученные элементы, в третьей - приведены величины разности между вычисленной нами орбитой и орбитой MPC, обозначенные как χ .

Таблица 3.11. Сравнение орбиты астероида 2014 JO25, полученной по наблюдениям Гиссарской обсерватории, и орбиты MPC

	M , град.	ω , град.	Ω , град.	i , град.	E	q , а.е.
МРС	58.78888	49.57129	30.65278	25.26995	0.8854328	0.23695540
ГисАО	59.55756	49.55544	30.65503	25.19058	0.8842405	0.23741165
χ	-0.76868	0.01585	-0.00225	0.07937	0.0011923	-0.00045625

Далее для 1847 наблюдений ГисАО были вычислены невязки (О-С) и получены величины среднеквадратического отклонения, обозначенные RMS, на основе элементов MPC и вновь полученных элементов:

элементы MPC: $RMS=11''.846$;

элементы из наблюдений обсерватории ГисАО: $RMS=78''.1$.

Обсерватория Санглох

Всего было обработано 775 наблюдений в интервале с 19 по 25 апреля 2017 г. В результате обработки всех наблюдений был получен неудовлетворительный результат. Далее наблюдения были поделены на две порции - с 19 по 23 апреля (565 наблюдений) и с 22 по 25 апреля (652 наблюдения). В первом случае была получена орбита с невязками $RMS=58''$, во втором случае - $RMS=5''$.

В табл. 3.12 приведены средние ошибки одного наблюдения по прямому восхождению α и склонению δ в угловых секундах для отдельных суток на основе элементов орбиты MPC.

Таблица 3.12. Точность наблюдений астероида 2014 JO25 обсерваторией Санглох

Апрель 2017 г.	α''	δ''
19	0.990	10.795
22	0.960	0.839
23	0.254	0.308
25	0.202	0.323

Полученные элементы были переведены на эпоху текущего каталога MPC JD2458000.5. В табл. 3.13 и 3.14 в первой строке приведены элементы MPC, во

второй - полученные элементы, в третьей - приведены разности χ между вычисленной нами орбитой и орбитой MPC.

Таблица 3.13. Сравнение орбиты астероида 2014 JO25, полученной по наблюдениям обсерватории Санглох 19-23 апреля 2017 г., и орбиты MPC

	M , град.	ω , град.	Ω , град.	i , град.	E	q , а.е.
MPC	58.78888	49.57129	30.65278	25.26995	0.8854328	0.23695540
Санглох	61.03774	49.54203	30.65999	25.01967	0.8817871	0.23847488
χ	-2.24886	0.02926	-0.00721	0.25028	0.0036457	-0.00151948

Таблица 3.14. Сравнение орбиты астероида 2014 JO25, полученной по наблюдениям обсерватории Санглох 22-25 апреля 2017 г., и орбиты MPC

	M , град.	ω , град.	Ω , град.	i , град.	E	q , а.е.
MPC	58.78888	49.57129	30.65278	25.26995	0.8854328	0.23695540
Санглох	59.58565	49.55262	30.65522	25.18668	0.8842068	0.23740718
χ	-0.79677	0.01867	-0.00244	0.08327	0.0012260	-0.00045178

Далее для 775 наблюдений в интервале 22-25 апреля обсерватории Санглох были вычислены невязки (O-C) на основе элементов MPC и вновь полученных элементов:

элементы MPC: $RMS=5''.364$;

элементы из наблюдений обсерватории Санглох: $RMS=68''.8$.

Таким образом, можно заключить, что из наблюдений обеих обсерваторий получена неплохая, вполне «узнаваемая» орбита.

Чем ближе объект к Земле, тем быстрее он движется по небу, и тем больше средняя ошибка одного наблюдения. Наибольший вклад в невязки

вносят наблюдения во время максимального сближения. Особенно сильно это обстоятельство сказывается на наблюдениях обсерватории Санглох, инструмент которой имеет небольшое поле зрения, в силу чего при коротких экспозициях на ПЗС-кадрах проявляется малое количество опорных звёзд.

Повышению точности таких наблюдений следует уделить особое внимание.

Улучшение орбиты

На втором этапе работы мы проверили возможность улучшения орбиты астероида, построенной по наблюдениям до его тесного сближения с Землей 19 апреля 2017 г., с помощью наблюдений во время этого сближения. Для улучшения орбиты в качестве исходных использовались элементы MPC на эпоху JD2457800.5, полученные по наблюдениям до 2017 г. Вычисления производились с учетом возмущений от планет, Луны, Плутона и четырех крупных астероидов, а также с учетом сжатия Земли. Использовалась численная эфемерида DE431/LE431. Исключение наблюдений из обработки производилось по правилу трех сигм.

Улучшение орбиты производилось с использованием трёх наборов наблюдений: мировых наблюдений, проводившихся в период сближения астероида с Землёй и собранных на сайте MPC, и наблюдений по отдельности ГисАО и обсерватории Санглох. В табл. 3.15-3.20 для всех трёх наборов приведены результаты этой работы: элементы улучшенной орбиты на две различные эпохи, их сравнение с исходной орбитой и с последней орбитой MPC, построенной по всем мировым наблюдениям. В этих таблицах приведен еще один элемент орбиты a – большая полуось.

Таблица 3.15. Элементы орбиты астероида 2014 JO25, улучшенной по мировым наблюдениям, и её сравнение с исходной орбитой MPC на эпоху JD2457800.5

Элементы	Исходные	Улучшенные	χ	Дисперсия
M , град.	352.51217	352.51216	-0.00001	0.000000
ω , град.	49.54200	49.54205	0.00005	0.000000
Ω , град.	30.65600	30.65602	0.00002	0.000000
i , град.	25.23774	25.23765	-0.00009	0.000006
E	0.8854182	0.8854182	0.0000000	0.00000000
a , а.е.	2.06697540	2.06697537	-0.00000003	0.000000003
q , а.е.	0.23683776	0.23683783	-	-

В табл.3.15 использовано 1420 наблюдений из 1684. Для первоначальной орбиты $RMS=5''.016$, по окончании обработки $RMS=0''.381$.

Таблица 3.16. Элементы орбиты астероида 2014 JO25, улучшенной по мировым наблюдениям, и её сравнение с орбитой MPC на эпоху текущего каталога JD2458000.5

Элементы	Улучшенные	MPC	χ
M , град.	58.78885	58.78885	0.00000
ω , град.	49.57129	49.57132	0.00003
Ω , град.	30.65281	30.65279	-0.00002
i , град.	25.26993	25.27014	0.00021
e	0.8854328	0.8854328	0.0000000
a , а.е.	2.06826618	2.06826011	-0.00000607
q , а.е.	0.23695533	0.23695540	0.00000007

Таблица 3.17. Элементы орбиты астероида 2014 JO25, улучшенной по наблюдениям Гиссарской обсерватории, и её сравнение с исходной орбитой MPC на эпоху JD2457800.5

Элементы	Исходные	Улучшенные	χ	Дисперсия
M , град.	352.51217	352.51225	0.00008	0.000003
ω , град.	49.54200	49.54221	0.00021	0.000008
Ω , град.	30.65600	30.65588	-0.00012	0.000003
i , град.	25.23774	25.23754	-0.00020	0.000012
e	0.8854182	0.8854182	0.0000000	0.00000000
a , а.е.	2.06697540	2.06698355	0.00000815	0.000000530
q , а.е.	0.23683776	0.23683870	-	-

В табл. 3.17 использовано 1669 наблюдений из 1847. Для первоначальной орбиты $RMS=11''.560$, по окончании обработки $RMS=0''.152$.

Таблица 3.18. Элементы орбиты астероида 2014 JO25, улучшенной по наблюдениям Гиссарской обсерватории, и её сравнение с орбитой MPC на эпоху текущего каталога JD2458000.5

Элементы	Улучшенные	MPC	χ
M , град.	58.78855	58.78885	0.00030
ω , град.	49.57144	49.57132	-0.00012
Ω , град.	30.65267	30.65279	0.00012
i , град.	25.26982	25.27014	0.00032
e	0.8854329	0.8854328	-0.0000001
a , а.е.	2.06827439	2.06826011	-0.00001428
q , а.е.	0.23695629	0.23695540	-0.00000089

Таблица 3.19. Элементы орбиты астероида 2014 JO25, улучшенной по наблюдениям обсерватории Сангдох, и её сравнение с исходной орбитой MPC на эпоху JD2457800.5

Элементы	Исходные	Улучшенные	χ	Дисперсия
M , град.	352.51217	352.51221	0.00004	0.000013
ω , град.	49.54200	49.54218	0.00018	0.000035
Ω , град.	30.65600	30.65593	-0.00007	0.000009
i , град.	25.23774	25.23787	0.00013	0.000056
e	0.8854182	0.8854182	0.0000000	0.00000001
a , а.е.	2.06697540	2.06698033	0.00000493	0.000002068
q , а.е.	0.23683776	0.23683840	-	-

Для улучшения орбиты в табл.3.19 использовано 724 наблюдений из 871. Для первоначальной орбиты $RMS=5''.736$, по окончании обработки $RMS=4''.257$.

Таблица 3.20. Элементы орбиты астероида 2014 JO25, улучшенной по наблюдениям обсерватории Сангдох, и её сравнение с орбитой MPC на эпоху текущего каталога JD2458000.5

Элементы	Улучшенные	MPC	χ
M , град.	58.788657	58.788847	0.000190
ω , град.	49.571414	49.571320	-0.000094
Ω , град.	30.652718	30.652789	0.000071
i , град.	25.270154	25.270141	-0.000013
e	0.8854328	0.8854328	0.0000000
a , а.е.	2.06827119	2.06826011	-0.00001108
q , а.е.	0.23695598	0.23695539	-0.00000059

3.1.3. Определение физических свойств астероида 2014JO25

Для определения некоторых физических параметров астероида 2014JO25 выполнена фотометрическая обработка кадров, полученных в двух обсерваториях 18-25 апреля 2017 г. с использованием программы MaxImDL-5 [126]. Видимые звездные величины астероида на каждом кадре находились по звездам сравнения вблизи астероида, выбранных из каталогов TYCHO-2, где блеск звезд приведен с точностью $\pm 0.1^m$, и UCAC2 с точностью определения блеска звезд $\pm 0.1^m - 0.3^m$. По ним были определены видимые звездные величины астероида 2014 JO25 в фильтрах *BVRI* и построены кривые блеска по наблюдениям в ГисАО и МАОС, представленные на рис. 3.3, где по оси ординат отложены видимые звездные величины m и по оси абсцисс - даты наблюдений в юлианских днях. В связи с очень быстрым перемещением астероида по небу 18 и 19 апреля 2017 г. измерения его звездных величин в ГисАО в эти ночи имеют невысокую точность и поэтому эти графики не приведены. Более достоверными являются измерения звездных величин в остальные ночи, которые показывают изменения яркости с амплитудой в пределах ошибок измерений (рис.3.3). Однако здесь не учтены фазы периода вращения объекта, охваченные нашим мониторингом, и по этой причине трудно сделать заключение о полной амплитуде изменения блеска астероида. Средние значения видимых звездных величин объекта, полученные в разных фильтрах, даны в табл. 3.21. Видимые звездные величины m конвертировались в абсолютные величины H по формуле (1.8) [92, 93].

Найденные таким путем абсолютные звездные величины астероида в четырех фильтрах (средние значения за ночь) приведены в табл. 3.22, где также даны величины показателей цвета *B-V*, *V-R*, *R-I*. Эти фотометрические данные являются инструментальными, т.к. коэффициенты трансформации инструментальных цветовых систем телескопов Цейсс-1000 и АЗТ-8 в

стандартную систему находятся на этапе определения. Зависимость абсолютных звездных величин астероида от даты наблюдений в ГисАО и МАОС приведена на рис. 3.4. Видимые звездные величины за весь период наблюдений постепенно снижались, т.к. астероид удалялся и от Солнца и от наблюдателя, но абсолютные звездные величины с учетом ошибок измерений варьировали вблизи эфемеридного значения. Измеренные абсолютные звездные величины астероида в полосе V находятся в диапазоне 17.29 ± 0.11 - 17.62 ± 0.04 (МАОС) и 17.44 ± 0.05 - 17.75 ± 0.06 (ГисАО) зв. вел., что близко к эфемеридному значению $H=17.8^m$.

Таблица 3.21. Видимые звездные величины астероида 2014 JO25 по наблюдениям в ГисАО и МАОС в апреле (UT) 2017 г.

Фильтр	18, 18.84	18, 18.84	19, 17.34	19, 20.00	22, 20.89	22, 21.10	23, 19.25	23, 19.25	24, 17.75	24, 17.75	25, 17.52	25, 18.42
	Гис АО	МА ОС	Гис АО	МА ОС	Гис АО	МА ОС	Гис АО	МА ОС	Гис АО	МА ОС	Гис АО	МА ОС
B	-	н/о	11.56 ± 0.04	н/о	13.95 ± 0.04	13.97 ± 0.12	13.90 ± 0.06	13.89 ± 0.02	15.10 ± 0.09	н/о	15.10 ± 0.03	15.10 ± 0.03
V	-	н/о	10.84 ± 0.04	н/о	13.05 ± 0.05	13.07 ± 0.11	13.38 ± 0.05	13.34 ± 0.02	14.24 ± 0.08	н/о	14.52 ± 0.02	14.47 ± 0.04
R	14.06 ± 0.11	н/о	10.36 ± 0.04	н/о	12.85 ± 0.04	12.87 ± 0.08	12.72 ± 0.03	12.75 ± 0.01	13.82 ± 0.06	н/о	14.12 ± 0.03	13.93 ± 0.03
I	14.01 ± 0.13	н/о	-	н/о	12.28 ± 0.06	12.35 ± 0.10	12.21 ± 0.05	12.21 ± 0.02	13.52 ± 0.03	н/о	13.81 ± 0.03	13.66 ± 0.03

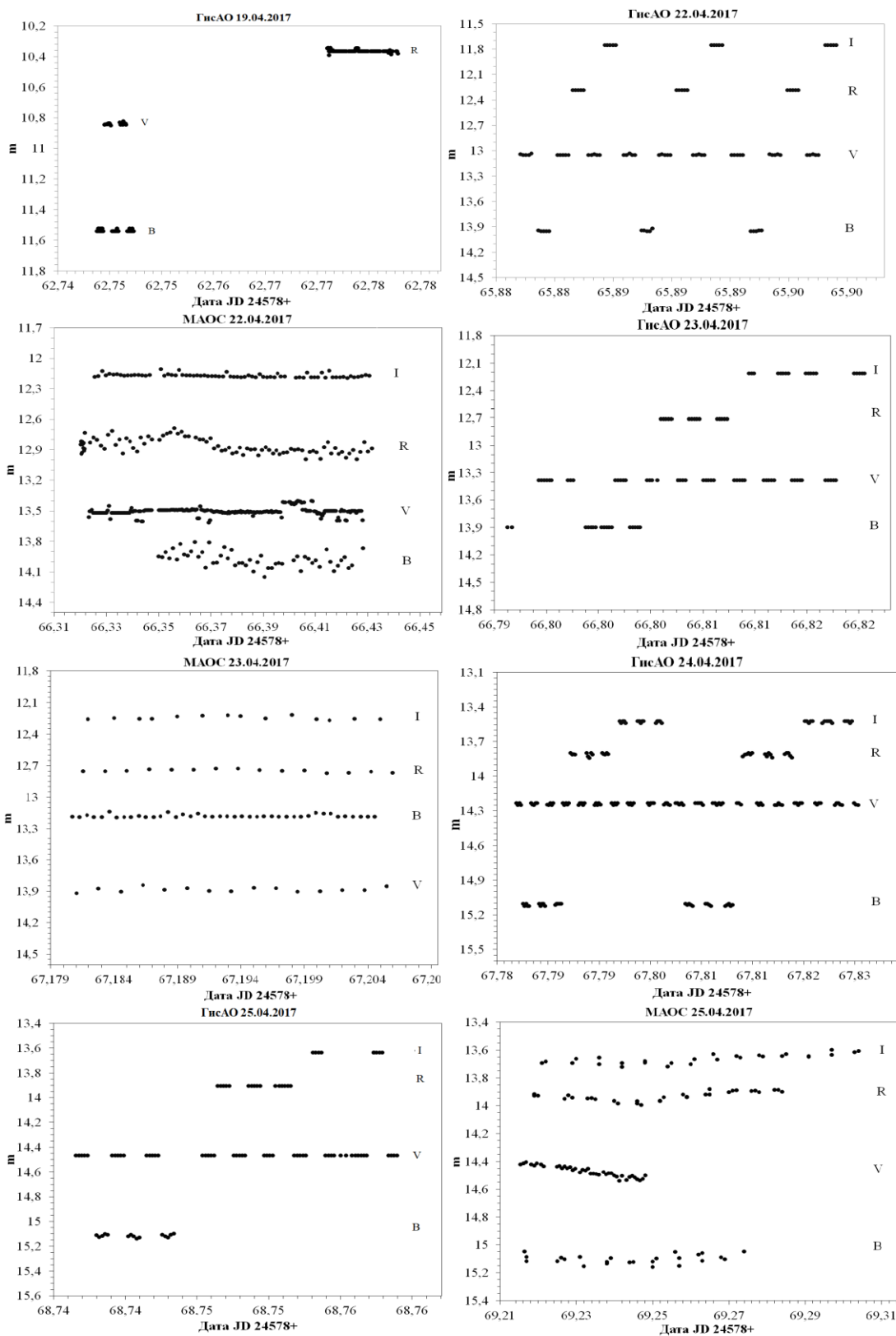


Рис.3.3. Кривые блеска в четырех фильтрах астероида 2014 JO25 по наблюдениям в ГисАО и МАОС 19-25 апреля 2017 г.

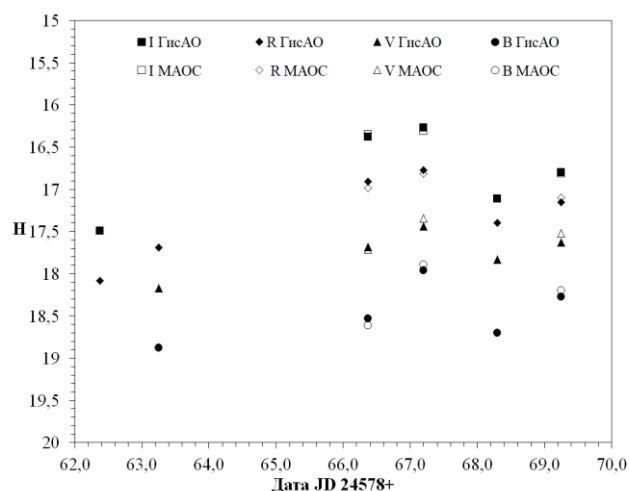


Рис.3.4. Абсолютные звездные величины (средние значения) в четырех фильтрах астероида 2014 JO25 по наблюдениям в ГисАО и МАОС в 2017 г.

Таблица 3.22. Абсолютный блеск H и инструментальные показатели цвета астероида 2014 JO25 по наблюдениям в ГисАО и МАОС в 2017 г.

Дата (UT)	r , а.е.	Δ , а.е.	hp , град.	H				Показатель цвета		
GisAO				B	V	R	I	B-V	V-R	R-I
апр.18,18.84	0.993752	0.018409	124.5148	-	-	18.08 ± 0.01	17.49 ± 0.03	-	-	0.59
апр.19,17.34	1.010417	0.012373	61.4265	18.88 ± 0.04	18.17 ± 0.04	17.69 ± 0.04	-	0.71	0.48	-
апр.22,20.89	1.065298	0.066047	24.2301	18.58 ± 0.04	17.68 ± 0.04	16.91 ± 0.02	16.38 ± 0.02	0.85	0.20	0.10
апр.23,19.25	1.081239	0.083906	24.8053	17.96 ± 0.06	17.44 ± 0.05	16.77 ± 0.03	16.27 ± 0.05	0.52	0.67	0.50
апр.24,17.75	1.097170	0.102011	25.3646	18.70 ± 0.09	17.83 ± 0.08	17.40 ± 0.06	17.11 ± 0.03	0.87	0.43	0.29
апр.25,17.52	1.113905	0.121278	25.9028	18.27 ± 0.05	17.63 ± 0.06	17.07 ± 0.03	16.80 ± 0.05	0.64	0.56	0.27
MAOC				B	V	R	I	B-V	V-R	R-I
апр.19,20.00	1.012383	0.013220	53.5958	н/о	н/о	н/о	н/о	-	-	-
апр.22,21.17	1.065298	0.066047	24.2000	18.61 ± 0.14	17.71 ± 0.11	17.49 ± 0.08	16.81 ± 0.10	0.90	0.22	0.68
апр.23,19.25	1.081239	0.083906	24.8053	17.95 ± 0.02	17.40 ± 0.02	16.81 ± 0.01	16.31 ± 0.02	0.55	0.59	0.50
апр.25,18.42	1.114487	0.121954	25.9239	18.25 ± 0.03	17.62 ± 0.04	17.08 ± 0.03	16.81 ± 0.03	0.63	0.54	0.27

Показатель цвета наряду с альбедо и спектральным типом является важной физической величиной, позволяющей определить принадлежность астероида к какому-либо таксономическому классу и на этой основе предположить его минералогический состав. В рамках квазисинхронной кампании астероид 2014 JO25 наблюдался на нескольких обсерваториях со светофильтрами международной широкополосной фотометрической системы *BVRI*. Это позволило сделать для него оценки показателей цвета *B-V*, *V-R*, *R-I*. Приведем показатели цвета, полученные в ходе квазисинхронных наблюдений, при этом необходимо отметить, что не все обсерватории провели определение коэффициентов трансформации инструментальных цветовых систем своих телескопов в стандартную. В табл. 3.23 даны показатели цвета астероида, полученные из наблюдений трех обсерваторий с 20 по 25 апреля 2017 г. в инструментальной фотометрической системе каждого телескопа, а также оценки их ошибок [157]. Показатели цвета в табл. 3.23 получены в результате фотометрической обработки кадров с использованием ПП АПЕКС II и поэтому здесь данные ГисАО и МАОС несколько отличаются от данных табл. 3.22. Как видно, достаточно хорошую сходимость результатов, полученных в разные ночи, показывают наблюдения Гиссарской обсерватории.

Таблица 3.23. Инструментальные показатели цвета астероида 2014 JO25, полученные на обсерваториях 102, 190, 193.

Пункт	Дата	<i>B-V</i>	<i>V-R</i>	<i>R-I</i>
Звенигород	2017-04-20	0.87±0.03	0.45±0.05	0.26±0.04
Санглох	2017-04-23	0.61±0.06	0.65±0.14	0.36±0.01
Санглох	2017-04-25	0.77±0.01	0.45±0.04	0.17±0.07
ГисАО	2017-04-23	0.78±0.01	0.44±0.01	0.34±0.02
ГисАО	2017-04-24	0.76±0.05	0.39±0.02	0.29±0.03
ГисАО	2017-04-25	0.76±0.03	0.41±0.03	0.32±0.03

В статье [161] приводится таблица соответствия показателей цвета в системе *BVRI* с таксономической классификацией астероидов по Д.Толену. Сопоставляя с этой таблицей полученные в настоящей работе показатели цвета, можно сделать предположение о принадлежности астероида 2014 JO25 к классам G, V или Q [157].

По абсолютным звездным величинам объекта можно оценить его размер. Эффективный диаметр астероида D вычислен по следующему эмпирическому соотношению, принятому для оценки размеров астероидоподобных тел [162]:

$$D = \frac{1329}{\sqrt{p_v} \cdot 10^{0.2H}}, \quad (3.1)$$

где $p_v=0.25$ – геометрическое альбедо астероида, H – абсолютные звездные величины в каком-либо фильтре. Оценки диаметра астероида по измерениям в фильтре R приведены в табл.3.24. Из табл. 3.24 видно, что 18 и 19 апреля астероид наблюдался при больших фазовых углах, причем разница между ними также велика. Поэтому наиболее достоверными являются измерения эффективного диаметра, полученные по данным наблюдений 22-25 апреля, когда астероид наблюдался на практически одинаковых фазовых углах. С учетом этого, оценка его размера заключена в интервале 0.87 ± 0.03 - 1.17 ± 0.02 км по данным ГисАО и 1.02 ± 0.01 - 1.15 ± 0.01 км по данным МАОС. Отметим, что эти величины согласуются между собой, и весьма близки к оценкам, имеющимся в литературе. Как отмечено выше, по радионаблюдениям диаметр составляет почти 1 км, по наблюдениям космической миссии NEOWISE – 0.65 км, база данных NEODYS - 0.83-1.86 км.

Мы попытались оценить период вращения астероида. Для поиска периодических изменений блеска использованы программа «Period04» [163], основанная на Фурье анализе, и все имеющиеся данные блеска в фильтре I . В результате получен спектр мощности, где амплитуда равная 1.09 соответствует

периоду вращения 5.5 часа. Напомним, что период вращения, найденный по радарным наблюдениям в апреле 2017 г., составляет 4.5 часа [154-155], но имеется и оценка периода в 5.6 ч. [156].

Таблица 3.24. Оценка диаметра астероида 2014 JO25

Дата (UT), 2017 г.	r , а.е.	Δ , а.е.	ph , град.	H_R , зв.вел..	D , Км
GisAO					
апр.18,18.84	0.993752	0.018409	124.5148	18.08±0.09	0.64±0.03
апр.19,17.34	1.010417	0.012373	61.4265	17.69±0.04	0.78±0.02
апр.22,20.89	1.065298	0.066047	24.2111	16.91±0.02	1.09±0.01
апр.23,19.25	1.081239	0.083906	24.8053	16.77±0.03	1.17±0.02
апр.24,17.75	1.097170	0.102011	25.3646	17.40±0.06	0.87±0.03
апр.25,17.52	1.113905	0.121278	25.9028	17.07±0.03	1.02±0.02
MAOC				H_R , зв.вел.	D , км
апр.19,20.00	1.012383	0.013220	53.5958	н/о	-
апр.22,21.10	1.065298	0.066047	24.2111	16.86±0.08	1.06±0.04
апр.23,19.25	1.081239	0.083906	24.8053	16.81±0.01	1.15±0.01
апр.25,18.42	1.114487	0.121954	25.9239	17.08±0.03	1.02±0.01

3.2. Квазисинхронные наблюдения потенциально опасного астероида (418094) 2007 WV4

Астероид, сближающийся с Землей, (418094) 2007 WV4 был открыт 19 ноября 2007 г. в обсерватории Кит-Пик в Аризоне [164]. По первым наблюдениям была определена его орбита, и стало очевидным, что астероид может сближаться с Землей до расстояний менее 3.1 млн. км. Один оборот вокруг Солнца он совершает за 1.8 года. Астероид перемещается в межпланетном пространстве с чрезвычайно высокой скоростью, необычной для астероидов, составляющей более 33 км/с. Спектральный класс пока не известен, период вращения по предварительным оценкам составляет 9.9 ч. [165, 166]. По данным космических наблюдений миссии NEOWISE оценка диаметра и оптическое альbedo астероида составляют 0.89 км и 0.04 [31]. Абсолютный блеск потенциально опасного астероида 2007 WV4 равен $H=19.6$ звездных величин [32]. Из-за тесных сближений с Землей ($MOID = 0.0174$) и размера астероид был классифицирован как потенциально опасный (ПОА) для Земли [33].

В июне 2017 г. произошел очередной близкий подход астероида к Земле. В ночь с 31 мая на 1 июня астероид пролетел мимо Земли на расстоянии менее 0.016 а.е. (2.44 млн. км). Следующее сближение астероида с Землей на расстоянии 0.015 а.е. произойдет в июне 2151 г. [167]. Дистанция, на которой произошло сближение астероида с Землей в 2017 г., является наименьшей, по крайней мере, за последние 400 лет.

Элементы орбиты ПОА 2007 WV4, принадлежащего группе Аполлона, приведены в табл. 3.25, где a – большая полуось, e – эксцентриситет, q , Q – перигелийное и афелийное расстояния, i – наклонение орбиты, ω – аргумент перигелия, Ω – долгота восходящего узла, T_j – критерий Тиссерана [33]. Орбита астероида имеет наклонение к эклиптике 39 град., перигелий равен 0.83 а.е.

(дата прохождения 7 февраля 2019 г.) и афелий – 2.14 а.е., значение критерия Тиссерана указывает на соответствие его орбиты астероидным орбитам.

Таблица 3.25. Элементы орбиты астероида 2007 WV4

Объект	Эпоха	a , а.е.	e	q , а.е.	Q , а.е.	i , град.	ω , град.	Ω , град.	T_j
2007 WV4	27.10.17	1.511	0.448	0.831	2.142	39.055	296.707	250.021	4.3

Момент наибольшего сближения астероида 2007 WV4 с Землей (0.02 а.е.) пришёлся на 1 июня. В связи с этим событием и создавшимися благоприятными условиями для мониторинга в июне 2017 г. вновь была проведена кампания по квазисинхронным наблюдениям астероида. Координатор кампании – ГАО РАН Пулково, целью являлось определение расстояния до астероида и вычисление его орбиты. В период с 1 по 5 июня пронаблюдать его удалось трём обсерваториям: в Уссурийске, Кисловодске и Гиссаре, однако из-за погодных условий только две из них выполнили наблюдения одновременно. Отметим, что видимая скорость движения астероида в момент наибольшего сближения с Землей достигала сотен угловых секунд в минуту, что сильно затрудняло как наблюдения, так и обработку. Промежуток времени общих наблюдений был очень короткий - около получаса. По этой причине вычислить орбиту достаточной точности не удалось. На рис. 3.5. приведена небесная траектория астероида 2007 WV4, построенная по этим наблюдениям (наблюдённые положения и аппроксимация полиномами).

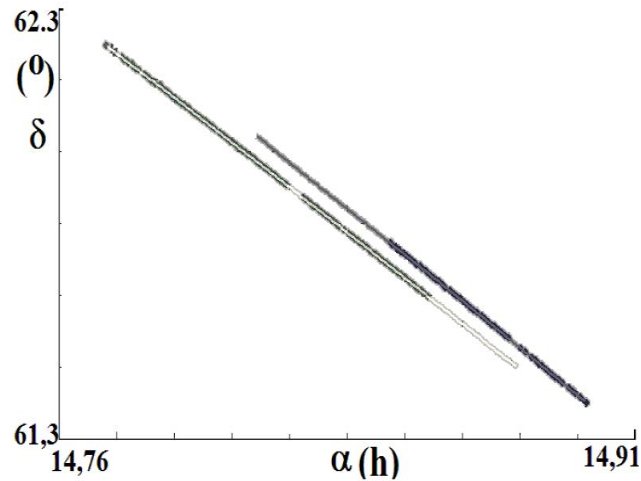


Рис. 3.5. Траектория астероида (418094) 2007 WV4, изображённая в экваториальных координатах, полученных из наблюдений обсерваторий С15 (Уссурийск) и 190 (Гиссар) 4 июня 2017 г.

Таким образом, можно заключить, что для вновь открытого объекта этот метод при существующих точностях астрометрических измерений может дать хорошую первоначальную орбиту за короткий (от 1 ч.) промежуток времени наблюдений при величине параллактического угла от $10'$ и более. Моделирование процесса базисных наблюдений показало, что улучшение точности астрометрических наблюдений примерно на порядок позволит уменьшить величину необходимого угла примерно до трёх угловых минут.

3.2.1. Определение координат и орбиты астероида

В рамках кампании по синхронному мониторингу на телескопе АЗТ-8 Гиссарской астрономической обсерватории (ГисАО) с 1 по 5 июня 2017 г. выполнены наблюдения астероида 2007 WV4 и получено несколько сотен изображений. Часть из них была использована при обработке в рамках кампании квазисинхронных наблюдений этого объекта тремя обсерваториями в России и Таджикистане [157]. Рассмотрим результаты независимой обработки наблюдений в ГисАО, выполненной для определения координат и орбиты астероида 2007 WV4.

Во время наблюдений в ГисАО получено 1140 снимков в фильтре R. Сводка наблюдений приведена в табл. 3.26, изображение астероида 2007 WV4, полученное во время наблюдений показано на рис. 3.6.

Таблица 3.26. Сводка наблюдений астероида 2007 WV4 в ГисАО

Дата	r , а.е.	Δ , а.е.	ph , град.	N x Фильтр	t , с
				ГисАО, АЗТ-8	
1.06.2017	0.997	0.020	143.9	291xR,	2-120
2.06.2017	1.003	0.024	115.8	291xR	2-120
4.06.2017	1.016	0.045	86.8	220xR,	2-120
5.06.2017	1.022	0.057	80.5	220xR,	2-120

Астрометрическая обработка наблюдений в ГисАО была выполнена с помощью программного пакета (ПП) АПЕКС-II [9]. В качестве опорного использован астрометрический каталог UCAC5, в котором астрометрическая точность координат звезд не превышает 0.05". Некоторые экваториальные

координаты 2007 WV4, найденные в результате астрометрической обработки наблюдений в ГисАО, приведены в табл. 3.27.



Рис.3.6. Астероид 2007 WV4, 04 июня 2017 г., экспозиция 120 сек:
АЗТ-8 ГисАО.

В табл. 3.28. представлены средние значения отклонений $(O-C)_\alpha$ и $(O-C)_\delta$ для координат α и δ , соответственно, а также их средние квадратичные ошибки σ_α и σ_δ по наблюдениям в ГисАО. Как видно, средняя по всем кадрам ошибка астрометрической редукции не превышает 0.5" и 0.1" для прямого восхождения α и склонения δ , соответственно. Результаты определения координат астероида по наблюдениям в ГисАО приведены на рис. 3.7, где по оси абсцисс даны прямое восхождение α и по оси ординат – склонение δ . На этом графике (рис. 3.7) слева для сравнения приведены также координаты объекта по другим наблюдениям из базы данных [168].

Таблица 3.27. Экваториальные координаты астероида 2007 WV4 по наблюдениям в ГисАО

№	Дата, 2017 г.	Момент наблюдений (UT)	α	δ	m (зв.вел.)
1	1 июня	18 ^h 45 ^m 25 ^s .0	07 ^h 23 ^m 36 ^s .54	+51° 2' 06".9	15.4
2	1 июня	18 46 08.2	07 23 38.29	+51 22 00.5	15.5
3	1 июня	18 46 52.3	07 23 40.48	+51 22 50.8	15.5
4	1 июня	18 47 34.6	07 23 47.34	+51 24 07.4	15.3
5	2 июня	18 58 33.0	10 50 00.00	+69 54 31.3	16.7
6	2 июня	19 08 04.1	10 51 37.55	+69 56 11.4	16.9
7	2 июня	19 09 36.5	10 51 57.15	+69 56 26.5	16.8
8	2 июня	19 20 32.3	10 53 49.23	+69 57 56.9	16.9
9	4 июня	17 38 13.6	14 50 08.22	+61 47 29.4	18.3
10	4 июня	17 39 47.8	14 50 07.79	+61 46 40.2	18.3
11	4 июня	17 41 21.1	14 50 12.35	+61 46 38.1	18.3
12	5 июня	17 58 42.2	15 19 34.84	+57 40 52.3	18.5
13	5 июня	18 02 49.3	15 19 40.14	+57 40 31.9	18.5
14	5 июня	18 04 52.0	15 19 41.23	+57 40 42.5	18.4
15	5 июня	18 06 54.7	15 19 42.80	+57 40 09.4	18.5

Таблица 3.28. Средние разности (O-C) и их стандартные отклонения для астероида 2007 WV4

Дата	$(O-C)_\alpha''$	σ_α''	$(O-C)_\delta''$	σ_δ''
01.06. 2017	0.506	0.056	-0.204	0.103
02.06. 2017	-0.104	0.014	-0.423	0.104
04.06. 2017	0.461	0.125	0.380	0.015
05.06. 2017	-0.501	0.116	0.500	0.116

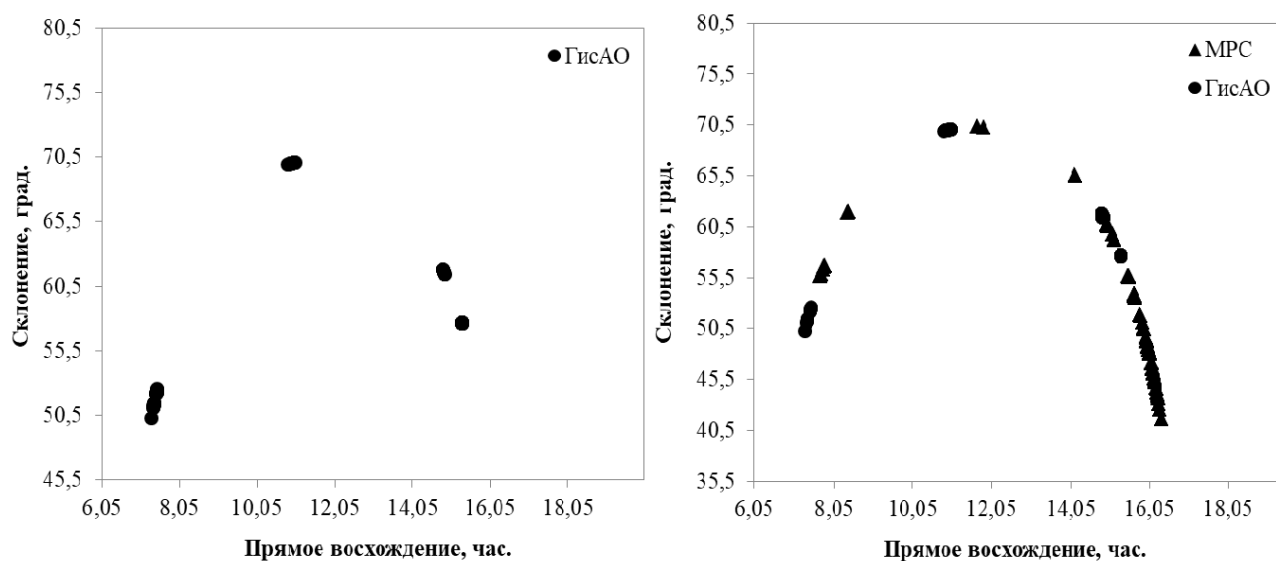


Рис.3.7. Видимая траектория астероида 2007 WV4 по наблюдениям в ГисАО 1-5. 06. 2017 г.

Используя измеренные координаты астероида в нескольких положениях можно построить его орбиту. Определение первоначальной орбиты выполнялось с использованием ПП ЭПОС [30]. Для среднего момента наблюдений ГисАО с использованием 150 наблюдений удалось получить первоначальную орбиту астероида, приведенную в табл. 3.29. Здесь даны обычные элементы орбиты в равноденствии 2000.0, а также n - среднее суточное движение, P – период обращения, σ - средняя квадратичная ошибка, в последнем столбце приведены величины разности между вычисленной нами орбитой и орбитой МРС, обозначенные как χ . Для сравнения в табл.3.29 приведена орбита, вычисленная на основе 350 наблюдений астероида в различных обсерваториях согласно базе данных МРС [168], и в последнем столбце приведены величины разности между вычисленной нами орбитой и орбитой МРС, обозначенные как χ . Как видно, с учетом разности моментов времени, на которые вычислена орбита, по наблюдениям в ГисАО получена орбита, близкая к другим данным.

Таблица 3.29. Сравнение первоначальной орбиты астероида 2007 WV4 полученной по наблюдениям обсерватории ГисАО, и орбиты MPC (J2000.0)

Элементы орбиты	ГисАО [данная работа]	[168]	χ
T	JD 2457860.1372	JD 2458522.0757	-
<i>Эпоха</i>	2457934.5	2458600.5	-
e	0.441928 ± 0.000021	0.441028	-0.0009
a , а.е.	1.485943 ± 0.000041	1.486458	0.000515
q , а.е.	0.830636 ± 0.000097	0.830888	0.000252
i , град.	38.333471 ± 0.000011	38.33365	0.000179
ω , град.	249.905541 ± 0.000415	249.89962	-0.005921
Ω , град.	297.636971 ± 0.000027	297.646391	0.00942
n , град./сут.	0.544237 ± 0.000114	0.543844	-0.000393
σ''	0".288	0".420	

3.2.2 Определение физических особенностей астероида

Для определения звездных величин и оценки диаметра астероида 2007 WV4 нами выполнена фотометрическая обработка кадров, полученных в ГисАО с использованием программного пакета (ПП) АПЕКС-II [9]. Видимые звездные величины астероида на каждом кадре находились по звездам сравнения, выбранных из каталога APASS [146], для которых блеск определен с точностью, равной 0.03^m и находящихся вблизи астероида. По ним были определены видимые звёздные величины астероида 2007 WV4 в фильтре R и построена кривая блеска, представленная на рис. 3.8, где по оси ординат отложены видимые звездные величины m и по оси абсцисс - даты наблюдений в юлианских днях. Средние значения видимых звездных величин объекта, полученные в фильтре R , даны в табл. 3.30. Наибольшее сближение астероида с Землей произошло 1 июня, однако в эту ночь нами получено меньшее значение видимой яркости. Это связано с тем, что в эту ночь объект имел наибольшую

величину фазового угла и, следовательно, мы наблюдали меньшую часть его поверхности.

Видимые звездные величины m конвертировались в абсолютные величины H по формуле (1.8) [92], позволяющей более точно описать изменение блеска астероида в диапазоне фазовых углов от 0 до 120 град. Найденный таким путем абсолютные звездные величины астероида в фильтре R (средние значения за ночь) приведен в табл. 3.30. Зависимость абсолютной яркости астероида от даты наблюдений в ГисАО приведена на рис. 3.8.

Эффективный диаметр астероида D вычислен эмпирическому соотношению 3.1, принятому для оценки размеров астероидоподобных тел, при этом использовано значение геометрического альбедо астероида $p_v=0.045$ [32]. Оценка диаметра астероида по измерениям в фильтре R приведена в табл. 3.30, по нашим измерениям эффективный диаметр колеблется в интервале от 0.72 ± 0.03 до 0.89 ± 0.02 км и эти величины весьма близки к оценкам, имеющимся в литературе.

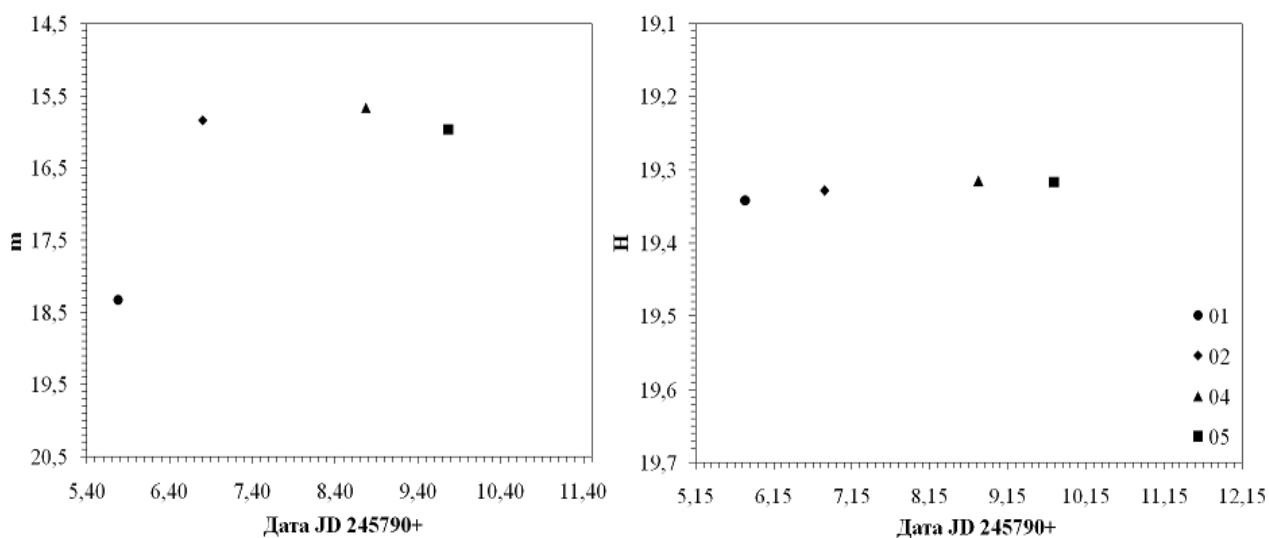


Рис. 3.8. Видимые (слева) и абсолютные звездные величины (справа) астероида 2007 WV4 по наблюдениям в ГисАО.

Как отмечено выше, по данным [32], диаметр астероида составляет почти 0.9 км, по наблюдениям космической миссии NEOWISE – 0.90 км [31], база данных NEODYS - 0.85 км [32].

Таблица 3.30. Видимые и абсолютные звездные величины, и оценка диаметра астероида 2007 WV4

Дата, 2017 г.	r , <i>a.e.</i>	Δ , <i>a.e.</i>	ph , <i>град.</i>	m_R , <i>зв.вел.</i>	H_R , <i>зв.вел.</i>	D , <i>Км</i>
1 июня	0.997	0.020	143.9	18.30 ± 0.07	19.31 ± 0.02	0.89 ± 0.02
2 июня	1.003	0.024	115.8	16.18 ± 0.09	19.68 ± 0.03	0.75 ± 0.03
4 июня	1.016	0.045	86.8	16.12 ± 0.09	19.77 ± 0.03	0.72 ± 0.03
5 июня	1.022	0.057	80.5	15.99 ± 0.02	19.34 ± 0.01	0.89 ± 0.01

Выводы по главе III

Проведены две кампании по квазисинхронным базисным наблюдениям потенциально опасных астероидов 2014 JO25 и 2007 WV4 с целью определения триангуляционным методом их положений и построения их орбит на основе короткого промежутка наблюдений.

Для астероида 2014 JO25 удалось этим методом построить орбиту, сравнимую по точности с орбитой, опубликованной MPC. В результате проведённого исследования показано, что при имеющейся точности астрометрических наблюдений для построения орбиты параллактический угол должен составлять не менее 10 угловых минут, а продолжительность совместных наблюдения двух обсерваторий должна быть не менее одного часа.

Координаты объекта на момент наблюдений, найденные по кадрам Гиссарской обсерватории и обсерватории Санглох, хорошо согласуются и между собой, и с другими наблюдениями. По данным наблюдений ГисАО и МАОС определена и улучшена орбита астероида 2014 JO25 в период его близкого подхода к Земле в апреле 2017 г. В данном мониторинге наблюдения ГисАО имели большую точность по сравнению с обсерваторией Санглох. Общий результат достаточно хорошо соответствует орбите MPC, которая была получена без использования указанных данных.

В результате фотометрической обработки найдены видимые и абсолютные звездные величины астероида в фильтрах BVRI. Показано, что абсолютные звездные величины по нашим измерениям близки к эфемеридному значению и в течение мониторинга их величина в пределах ошибок измерений практически не изменялась. Получена оценка показателей цвета астероида 2014 JO25 в широкополосной системе BVRI и сделано предположение его минералогического состава. Значения диаметров, полученные на основе абсолютного блеска, согласуются с имеющимися данными по размеру

астероида. По предварительным оценкам период вращения астероида равен 5.5 часа.

В результате астрометрической обработки наблюдений астероида 2007 WV4 во время его сближения с Землей определены координаты и вычислена первоначальная орбита, результат находится в хорошем соответствии с орбитой MPC. По фотометрическим измерениям найдены видимые и абсолютные звездные величины объекта, а также оценен его размер. Показано, что в период наблюдений абсолютные звездные величины астероида были близки к эфемеридному значению, и их величина практически не изменялась; оценка диаметра вполне согласуется с имеющимися данными.

Найденные динамические и физические свойства астероидов свидетельствует о приемлемой точности выполненных наблюдений и надежности астрометрических и фотометрических измерений. Кроме того, они подтверждают апробированность и достоверность использованных в исследовании методов и приемов, а также программных пакетов, позволяющих выполнять обработку кадров с необходимой точностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

С целью изучения комет и астероидов в работе использован наблюдательный материал, полученный в двух обсерваториях Института астрофизики АН РТ. Основные результаты, полученные в диссертации, можно сформулировать в виде следующих выводов:

Исследованы динамические и физические характеристики избранных короткопериодических комет и астероидов, сближающихся с Землей, на основе оптических многоцветных наблюдений в астрономических обсерваториях Института астрофизики АН РТ. Для усовершенствования методики астрометрической и фотометрической обработки наблюдений впервые в ИА АН РТ был адаптирован и внедрен ПП Апекс II, анализ результатов, полученных на основе его использования, показал достаточную точность определения координат и звездных величин объектов.

В 2007 г. зарегистрирована вспышка яркости кометы 17Р в результате деления ядра, определен момент фрагментации, получена оценка скорости разлета фрагментов, показано, что причиной деления ядра, скорее всего, является столкновение.

Полученные динамические и физические параметры кометы 41Р подтверждают принадлежность кометы к активным кометам семейства Юпитера. Динамические и физические свойства кометы 29Р, найденные из наблюдений, морфология и выявление пылевых структур в коме кометы подтверждают принадлежность кометы к активным объектам группы Кентавров и, следовательно, к объектам пояса Койпера. Кометная активность на больших гелиоцентрических расстояниях вновь получила подтверждение.

На основе квазисинхронных наблюдений определены координаты и вычислены орбиты потенциально опасных астероидов 2014 JO25 и 2007 WV4.

Для астероида 2014 JO25 выполнено улучшение первоначальной орбиты, в результате получена орбита очень близкая к орбите MPC.

Показано, что точность астрометрических измерений позволяет определять орбиты астероидов с минимальными ошибками. Определены физические свойства астероидов, на основе найденных показателей цвета и таксономической классификации сделано предположение о минералогическом составе объектов.

В качестве перспективы исследований в этом направлении предполагается продолжить оптические наблюдения комет и потенциально опасных астероидов в течение больших временных рядов. Это необходимо для вычисления орбит с высокой точностью и, следовательно, прогнозировать возможные опасные сближения. Кроме того, появится возможность получать более детальные кривые блеска объектов и на основе современных теоретических подходов определять параметры вращения и моделировать геометрические фигуры объектов. Также планируется внедрить спектральные наблюдения объектов для получения сведений о составе и структуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Borovicka J. About the definition of meteoroid, asteroid, and related terms// 2016 WGN, The Journal of the IMO. – 2016. – 44:2. – P. 31-34.
2. Morbidelli A., Gladman B. Orbital and temporal distributions of meteorites originating in the asteroid belt//Meteoritics & Planetary Science. – 1998. – Vol. 33. - № 5. – P. 999–1016.
3. Nemtchinov, I., Svetsov, V.V., Shuvalov, V.V. Main factors of hazards due to comets and asteroids//Catastrophic events Caused by Cosmic Objects, Adushkin V.V., Nemtchinov I.V. (Eds.); Springer. – 2008. – P. 1–89. 2008
4. Borovička J., Spurný P., Brown P., Wiegert P., Kalenda P., Clark D., Shrbený L. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor//Nature. – 2013. – Vol. 503. – P. 235–237.
5. Popova O., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. Chelyabinsk meteoroid entry and airburst damage//Science. – 2013. – Vol. 342. – Issue 6162. – P. 1069–1073.
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. Медведев Ю.Д. Определение орбит астероидов, сближающихся с землей, по наблюдениям первой оппозиции//Астрон. вестник. – 2011. – Т. 45. - № 5. – С. 396–401.
8. 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//Astron. J. – 1984. – Vol. 89. – P. 571–578.
9. Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Верещагина И.А. Программные пакеты «АПЕКС-I» и «АПЕКС-II» для обработки астрономических ПЗС-наблюдений//Астрон. вестник.–2010.- № 1.–С.74–87.

10. Montalto M., Riffeser A., Hopp U., Wilke S., Carraro G. The comet 17P/Holmes 2007 outburst: the early motion of the outburst material//Astron. and Astrophys. – 2008. – V. 479. – L45.
11. Lin Z.Y., Lin C.S., Weiler M., Rauer H., Ip W.H. The outburst of comet 17P/Holmes//Astron. J. – 2007. Vol. 138. – P. 625–632.
12. Stevenson R., Kleyna J., Jewitt D. Transient fragments in outbursting comet 17P/Holmes//Astron. J. – 2010. Vol. 139. – P. 2230–2240.
13. NEODyS-2 – Near Earth Objects –Dynamic Site. URL: <http://newton.dm.unipi.it/neodys>, Дата обращения 08.12.2017.
14. JPL Small-Body Database Browser. URL: <https://ssd.jpl.nasa.gov> Дата обращения 20.01.2020.
15. Near-Earth Object Wide-field Infrared Survey Explorer. URL: <https://www.nasa.gov/missionpages/neowise/main/index.html> Дата обращения 08.01.2020.
16. Sekanina Zd. The problem of split comets in review//Comets. – 1982. – P. 251 – 287.
17. Рябова Г.О. Моделирование метеороидных потоков: Скорости выброса метеороидов из комет (обзор)//Астрон. вестник. - 2013, том 47, № 3, с. 236–256.
18. Sekanina Zd., The problem of split comets revisited//Astron. and Astrophys. – 1997. – Vol. 318. – L5.
19. Agarwal, J., Jewitt, D., Weaver, H. Dynamics of Large Fragments in the Tail of Active Asteroid P/2010 A2//Astrophys. J. – 2013. Vol. 769. - № 1. – P. 46.
20. Кохирова Г.И., Буриев А.М., Хамроев У.Х., Баканас Е.С., Мулло-Абдолов А.Ш., Абуллоев С.Х. Наблюдения кометы 41P/Туттля-Джакобини-Кресака в период ее сближения с Землей в астрономических обсерваториях Таджикистана//ДАН РТ. – 2018. – Т. 61. - № 7–8. – С. 620–631.

21. Lamy P.L., Toth I., Fernandez Y.R., Weaver H.A. The Sizes, Shapes, Albedos, and Colors of Cometary Nuclei//Comets II/Eds. M.C. Festou, H.U. Keller, H.A. Weaver. Tucson: Univ. Arizona Press. – 2004. – P. 223–264.
22. Jewitt D. Color systematics of comets and related bodies//The Astron. J. – 2015. – Vol.150. - № 201. – P. 201–219.
23. Solontoi M. et al. Ensemble properties of comets in the Sloan Digital Sky Survey//Icarus. – 2012. – Vol. 218, Issue 1. – P. 571–584.
24. Holmberg J., Flynn C., Portinari L. The colours of the Sun//MNRAS. – 2006 – Vol. 367. – P. 449–453
25. 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//ДАН РТ. – 2018. – Т. 61. - № 9–10. – С 742–751.
26. Cruikshank D.P., Brown R.H. The nucleus of comet P/Schwassmann-Wachmann 1//Icarus. – 1983. – Vol. 56. – P. 377 – 380.
27. Meech K.J., Belton M.J.S., Mueller B.E.A., Dicksion M.W., Li H.R. Nucleus properties of P/Schwassmann-Wachmann 1//Astron. J. – 1993. – Vol. 106. –P. 1222–1236.
28. Jet Propulsion Laboratory – CNEOS (Center of Near Earth Object Studies): NEO Earth Close Approaches. URL: <https://cneos.jpl.nasa.gov/ca/> Дата обращения 08.12.2017.
29. Senay M.C., Jewitt D. Coma formation driven by carbon monoxide release from comet Schwassmann-Wachmann 1//Nature. – 1994. – P. 371–229.
30. Львов В.Н., Цекмейстер С.Д. Использование программного пакета ЭПОС для исследования объектов Солнечной системы//Астрон. вестник. – 2012. - Т. 46. - № 2. - С. 190 – 192.
31. Mainzer A., Bauer J., Grav T., Masiero J. et. al., Preliminary Results from NEOWISE: An Enhancement to the Wide-field Infrared Survey Explorer for Solar System Science//The Astrophys. J. – 2011a. – Vol. 731, Issue 1. -№. 53, (pp.13).

32. Mainzer A., Grav T., Masiero J., Bauer J., et., al. Thermal model calibration for minor planets observed with wide-field infrared survey explorer/NEOWISE//The Astrophys. J. – 2011c. – Vol. 100, (9pp).
33. Mainzer A., Grav T., Bauer J., Masiero J., McMillan R. S., et., al. NEOWISE Observations of Near-Earth objects: Preliminary Results//The Astrophys. J. – 2011b. – Vol. 743. - Issue 2. - № 156, (pp17).
34. Whipple F.L. A comet model I. The acceleration of comets//Astrophys. J. –1950. –Vol. 111. – № 2. – P. 375–394.
35. Whipple F.L. A comet model II. Physical relation for comets and meteors//Astrophys. J. – 1951. – Vol. 113. – № 3. – P. 464–474.
36. Whipple F.L. A Comet Model. III. The Zodiacal Light//Astrophys. J. – 1955. – Vol. 121. – P. 750–770.
37. Ma Y.H., Williams I.P., Ip W.H., Chen W. The velocity distribution of periodic comets and the meteor shower on Mars//Astron and Astrophys. – 2002. – Vol. 394. – P. 311–316.
38. Jewitt D.C. Cometary Photometry, invited review//Comets In The Post - Halley Era/eds. R.L. Newburn et al. – Kluwer Academic Publishers, Netherlands. – 1992. – Vol. 1. – P. 19–65.
39. Kresak L. The discrimination between cometary and asteroidal meteors. I. The orbital criteria//Bull. Astron. Czech. – 1969. – Vol. 20. - № 4. – P. 177–188.
40. Kresak L. On the similarity of orbits of associated comets, asteroids and meteoroids//Bull. Astron. Czech. – 1982. – Vol. 33. – P. 104–110.
41. 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.
42. Jewitt D. The Active Asteroids//Astron. J. – 2012. Vol. 143. – P. 66–70.
43. Hsieh H.H., Jewitt D. A population of comets in the main asteroid belt//Science. – 2006. – Vol. 312. – P. 561 – 563.

44. Jewitt D., Yang B., Haghighipour N., Main belt of asteroids Comet P/2008 (Garradd)//Astron. J. – 2009. - Vol. №137. – P. 4313–4321.
45. Hsieh H.H., Jewitt D., Fernandez Y.R. Albedos of Main-Belt Comets 133P/Elst-Pizarro and 176P/LINEAR//Astroph. Journal Letters. – 2009a. – Vol. 694. № 2. – P. 111–114.
46. Hsieh H.H., Jewitt D., Ishiguro M. Physical Properties of Main-Belt Comet P/2005 U1 (Read)//Astron. J. – 2009b. – Vol. 137. № 1. – P. 157–168.
47. Opik E.J. The stray bodies in the Solar System. I. Survival of cometary nuclei//Adv. Astron. and Astrophys. – 1963. – Vol. 2. – P. 219–262.
48. Бабаджанов П.Б., Кохирова Г.И. Метеорные потоки астероидов, пересекающих орбиту Земли. Душанбе: Изд-во АН РТ «Дониш», 2009, 185 с.
49. Larson S.M. (596) Scheila//IAUC. – 2010. - № 9188.
50. Larson S., Kowalski R., Sato H., Yoshimoto, K. Nakano S. 596 (Scheila)//CBET. – 2010. - № 2583. – P. 1.
51. Jewitt D., Hsieh H., Agarwal J. The active of asteroids//In: Michel P., DeMeo F., Bottke W. (Eds.), Asteroids IV. University of Arizona Space Science Series. – 2016. – P. 221.
52. Masiero J.R., Mainzer A.K. et., al. Preliminary Analysis of WISE/NEOWISE 3-Band Cryogenic and Post-cryogenic Observations of Main Belt Asteroids//Astroph. J. Letters. – 2012. – Vol. 759. – L8 (5p.).
53. Duncan M., Levison H., Dones L. Dynamical evolution of ecliptic comets//Comets II/Eds. M.C. Festou, H.U. Keller, H.A. Weaver. Tucson: Univ. Arizona Press. – 2005. – P. 193–204.
54. Barucci M.A., Doressoundiram A., Cruikhand D.P. Surface characteristics of transneptunian objects and centaurs from photometry and spectroscopy//Comets II/Eds. M.C. Festou, H. U. Keller, H. A. Weaver. Tucson: Univ. Arizona Press. – 2005. – P. 647–658.

55. Dones L., Weissman., Levison H.F., Duncan M.J. Oort Cloud Formation and Dynamics//Astron. Society of the Pacific. – 2004. – Vol. 323. – P. 371 – 379.
56. Fernandez J.A., Gallardo T., Brunini A., The scattered disk population as a source of Oort cloud comets/Evaluation of its current and past role in populating the Oort cloud//Icarus. – 2004. – Vol. 172. – P. 372–381.
57. Емельяненко В.В., Шустов Б.М. Челябинское событие и астероидно-кометная опасность//Успехи физических наук. – 2013. – Vol. 183. - № 8. – P. 885–888.
58. Weissman P.R. Physical loss of long-period comets//Astron. Astrophys. – 1980. – Vol. 1919. – P. 196.
59. Levison H. F. et al. The Mass Disruption of Oort Cloud Comets//Science. – 2002. – Vol. 296. – P. 2212–2215.
60. Коноплева В.П. Активные процессы в кометных ядрах//Активные процессы в кометах. – Киев: Науко думка. – 1967. – С. 57–68.
61. Голубев В. А. Распад кометных ядер. I. Каталог распавшихся комет//Проблемы космической физики. – 1975. – Вып. 10. – С. 23–33.
62. Sekanina Zd. Relative motion of fragments of the split comets. I. A new approach//Icarus. – 1977. – Vol. 30. - № 3. – P. 574–594.
63. Sekanina Zd. Relative motion of fragments of the split comets. II. Separation velocities and differential decelerations for extensively observed comets//Icarus. – 1978. – Vol. 33. - № 1. – P. 173–185.
64. Sekanina Zd. Relative motion of fragments of the split comets. III. A test of splitting and comets with suspected multiple nuclei//Icarus. – 1979b. – Vol. 38. - № 2. – P. 300–316.
65. Pittich E.M. Space distribution of the splitting and outburst of comets//BAC. – 1971. – Vol. 22. - № 4. – P. 143–153.
66. Kresak L. The origin and the brightness decrease of comet//BAC. – 1974. – Vol. 25. - №. 2. – P. 87–112.

67. Добровольский О.В., Герасименко С.И. Каталог комет с признаками дробления ядер//БИА АН РТ. – 1987. - № 77. – С. 3–9.
68. <https://minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.html> (дата обращения 31.01.2020).
69. Tholen D.J. Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Photometry// Ph. D. Thesis, Univ. of Arizona. – 1984.
70. Hanus J., Delbo M., Vokrouhlicky D., et al. Near-Earth asteroid (3200) Phaethon: Characterization of its orbit, spin state, and thermophysical parameters//Astron. and Astrophys. – 2016. - V. 592. - P. 34.
71. Kaasalainen M., Torppa J. Optimization Methods for Asteroid Lightcurve Inversion. I. Shape Determination//Icarus. – 2001. - V. 153. - P. 24.
72. Kaasalainen M., Torppa J., Muinonen K. Optimization Methods for Asteroid Lightcurve Inversion. II. The Complete Inverse Problem//Icarus. – 2001. –V.153. - P. 37.
73. Gehrels T., McMillan R.S. CCD scanning for asteroids and comets//NASA, Washington Reports of Planetary Astronomy. – 1985a. – P. 90-91 (SEE N87-12407 03-89).
74. 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).
75. Дейч А.Н. Фотографическая астрометрия//Курс астрофизики и звездной астрономии//под.ред.акад. А.А. Михайлов. – М.: Наука. – 1973. – Том. 1. – С. 178–271.
76. Киселёв А.А. Теоретические основания фотографической астрометрии. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1989. – 264 с.
77. Саваневич В.Е., Брюховецкий А.Б. Иващенко Ю.Н. и др. Сравнительный анализ показателей точности позиционных ПЗС-измерений малых тел Солнечной системы программными обеспечениями CoLiTec и

- Astrometrica//Кинематика и физика небесных тел. – 2015. – Т. 31. - № 6. – С. 55 – 69.
78. Vaduvescu O. 280 one-opposition near-Earth asteroids recovered by the EURONEAR with the Isaac Newton Telescope//Astron. and Astrophys. – 2018. – Vol. 609. – P. 105–110.
79. 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.
80. Майгурова Н.В. Уточнение связи оптической и радио систем координат по ПЗС-наблюдениям избранных внегалактических радиоисточников в оптическом диапазоне. – Дис. канд. физ.-мат. наук. – Киев. – Машинопись. – 2006. – 142 с.
81. 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.
82. Orbit determination from observations. URL: https://www.projectpluto.com/find_orb.htm Дата обращения 5.05.2017.
83. Понтрягин Л.С. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Физматгиз. – 1961. – 300 с.
84. Пуанкаре А. Избранные труды. - Т. I. – 1971. и - Т. II. Наука. – 1972. – 287 с.
85. Малкин И.Г. Методы Ляпунова и Пуанкаре в теории нелинейных колебаний. М.: Гостехиздат. – 1949. – 321 с.
86. Малкин И.Г. Некоторые задачи теории нелинейных колебаний. М.: Гостехиздат. – 1956. – 371 с.
87. Дубошин Г.Н. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике. – М.: Наука. – 1976. – 864 с.
88. Harris A.W. Tumbling asteroids//Icarus. – 1994. – Vol. 107. – P. 209–211.
89. Lumme K., Karttunen H., Bowell E., Poutanen, M. Inversion of asteroid lightcurves using spherical harmonics//Asteroids, comets, meteors II;

- Proceedings of the International Meeting, Uppsala, Sweden, June 3-6. Uppsala, Sweden, Astronomiska Observatoriet. – 1986. – P. 55–59.
90. Тупиева Ф.А. О влиянии вращения астероида на фазовую зависимость блеска//БИА АН Тадж. ССР. – 1987. -№ 77. -С. 43–46.
91. Тупиева Ф.А. Сравнительный анализ фазовых зависимостей блеска астероидов//Кинематика и физика небесн. тел. – 1991. - Т. 7. - № 3. - С. 42–51.
92. Bowell E., Hapke B., Domingue D. Application of photometric models to asteroids//In: Asteroids. Ed. Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S., Tucson: Univ. of Arizona Press. – 1989. – P. 524–556.
93. 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.
94. Snodgrass C., Lowry S.C., Fitzsimmons A. Photometry of cometary nuclei: rotation rates, colours and a comparison with Kuiper Belt Objects//Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2006. – Vol. 373. – P. 1590–1602.
95. Snodgrass C., Lowry S.C., and Fitzsimmons A. Optical observations of 23 distant Jupiter Family Comets, including 36P/Whipple at multiple phase angles//Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2008. – Vol. 385. – P. 737–756.
96. Keller H.U., Delamere W.A., Huebner W.F. et., al. Dust activity of Comet Halley's nucleus// In ESA Proceedings of the 20th ESLAB Symposium on the Exploration of Halley's Comet. – 1986. – Vol. 2. – P. 359–362.
97. Sagdeev R.Z., Blamont J., Galeev A.A., Moroz V.I. VEGA spacecraft encounters with comet Halley//Nature. – 1986. – Vol. 321. – P. 259–261.
98. Зелёный Л.М, Ксанфомалити Л.В. От миссии «Вега» у кометы Галлея к миссии «Розетта» у кометы 67P/Чурюмова – Герасименко//Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. – 2015. –Т . 29. - № 3. – С. 81–94.
99. Soderblom L.A., Becker T.L., Bennett G., Boice D.C., Britt D.T. et. al., Observations of comet 19P/Borrelly by the Miniature Integrated Camera and

- Spectrometer aboard Deep Space 1//Science. – 2002. – Vol. 296. – P. 1087–1091.
100. Brownlee D.E., Horz F., Newburn R.L., et., al. Surface of Young Jupiter Family Comet 81 P/Wild 2/View from the Stardust Spacecraft// Science. – 2004. – Vol. 304. – Issue 5678. - P. 1764–1769.
 101. A’Hearn M. F., Belton M. J. S., Delamere W. A., Kissel J. et. al., Deep Impact: Excavating Comet Tempel 1//Science. - 2005. - Vol. 5746. – P. 258–264.
 102. Ксанфомалити Л.В., Чурюмов К.И. Комета 67P/Чурюмова-Герасименко: аппараты розетта и Филы у цели//Астрон. вестник. – 2015. – Т. 49. - № 3. – С. 224–240.
 103. Чурюмов К.И., Мельник М.В. Результаты исследований ядра и атмосферы кометы Чурюмова – Герасименко космическим аппаратом Розетта и посадочным модулем Филы//Радиотехника. – 2016. – Вып. 184. – С. 13–21.
 104. Lamy P.L., Toth I., A’Hearn M.F., Weaver H.A. Hubble Space Telescope Observations of the Nucleus of Comet 45P/Honda-Mrkos-Pajdusakova and Its Inner Coma//Icarus. – 1999. – Vol. 140. – Issue 2. – P. 424–438.
 105. Ip W.H., Fernandez J.A. On dynamical scattering of Kuiper Belt Objects in 2:3 resonance with Neptune into short-period comets//Astron. and Astrophys. – 1997. – V. 324. – P. 778–784.
 106. 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 Санглох//Астрон. вестник. – 2018. – Т 52. - № 6. – С. 511–520.
 107. Zacharias M.I. The fourth US Naval Observatory CCD astrograph catalogue (UCAC4)//Astron. J. – 2013. – Vol. 145. – P. 44–49.
 108. The International Astronomical Union – Minor Planet Center. URL: <http://www.minorplanetcenter.net/iau>. М.Р.С. 808122, Дата обращения 15.05. 2017.

109. The International Astronomical Union – Minor Planet Center. URL: <http://www.minorplanetcenter.net/iau>. М.Р.С. 421631 Дата обращения 15.05.2017.
110. Всехсвятский С.К. Физические характеристики комет. М.: Физматгиз. - 1958. - 575 с.
111. Chebotarev G. A., Marsden B. G., The Motion, evolution of orbits, and origin of comets; symposium August 4-11, № 45, held in Leningrad, U.S.S.R., 1970.
112. Roger W.S. Comet Holmes Undergoes Huge Outburst//Sky and Telescope. URL: <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/observing-news/comet-holmes-beckons-skygazers-worldwide.innott> Дата обращения 20.11.2007.
113. URL: <http://www.aerith.net/comet/catalog/0017P/2007.html>, Дата обращения 5.05.2019.
114. Peterson C.L. Cloudbait Observatory, Colorado//(Archived 2011-05-25 at the Wayback Machine) URL: <https://web.archive.org/web/20110708165528/http://www.cloudbait.com/index.php> Дата обращения 20.11.2019.
115. Ибадинов Х.И. Астрокурьер (Информационный выпуск), 2007 г. URL: <http://www.sai.msu.ru/EAAS/rus/astrocourier/index.html> Дата обращения 19.11.2007.
116. Ибадинов Х.И., Буриев А.М. Распад ядра кометы 17P/Холмса//ДАН РТ. – 2009. – Т.52. - № 9. – С. 685–688.
117. The International Astronomical Union – Minor Planet Center. МPEC 2019-J142. URL: <https://www.minorplanetcenter.net/mpec/K19/K19JE2.html> Дата обращения 19.11.2007.
118. Sekanina Z. Activity of comet Hale-Bopp (1995 O1) beyond 6AU from the Sun//Astron. and Astrophys. – 1996. – Vol. 314. – P. 957–965.
119. Sekanina Z. Collision of comet Shoemaker-Levy 9 with Jupiter: impact study of two fragments from the timing of precursor events//Astron. and Astrophys. – 1996. – Vol. 314. – P. 315–327.

120. Williams T.R., Jeremie V., Carey M.L., Mikel H., Jeonghee R. Explosion of Comet 17P/Holmes as revealed by the Spitzer Space Telescope//Icarus. 2010. – V. 208. Issue 1. – P. 276–292.
121. JPL Small-Body Database Browser. URL: <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top> Дата обращения 10.06.2017.
122. Farnham T.L. et al. Comet 41P/T-G-K. – CBET 4375, 2017.
123. Knight M.M. et al. Comet 41P/T-G-K.–CBET 4377, 2017.
124. URL: <http://www.astrometrica.at> Дата обращения 10.06.2018.
125. Gareth V. W, MPEC 2017-H20. URL: <https://www.minorplanetcenter.net/mpec/K17/K17H20.html> Дата обращения 5.05. 2017.
126. URL: <http://www.kopona.net/soft/multimedia/29829-maxim-dl-pro-suite-v515> Дата обращения 10.05. 2017.
127. URL: <http://tdc-www.harvard.edu/catalogs/index.html> Дата обращения 17.05. 2017.
128. Russel H.N. On the Albedo of the Planets and Their Satellites//Astrophys. J.- 1916. – Vol. 43. – P.173 – 196.
129. Tancredi G., Fernández J. A., Rickman H., and Licandro J. A catalog of observed nuclear magnitudes of Jupiter family comets//Astron. Astrophys. Sup. Ser. – 2000. – Vol..146. – P. 73–90.
130. Jewitt D., Luu J. Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB1//Nature. – 1993. – Vol. 362. - P. 730 – 732.
131. Jewitt D., Kalas P. Thermal observations of Centaur 1997 CU26//The Astrophys. J. – 1998. – Vol. 499. L103–L106.
132. 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.
133. Bailey B., Malhotra R. Two dynamical classes of Centaurs//Icarus. – 2009. – Vol. 294. - № 203. – P. 155–163.

134. Levison H. F., Duncan M. J. From the Kuiper Belt to Jupiter-Family Comets: The Spatial Distribution of Ecliptic Comets//Icarus. –1997. – Vol. 127. – 13L.
135. Barucci A.M., Doressoundiram A., Cruikshank D.P. Surface characteristics of transneptunian objects and Centaurs from photometry and spectroscopy// Comets II (M.C. Festou et al., eds.), Univ. of Arizona Press, Tucson. - 2004. – P. 647 – 658.
136. Luu J.X., Jewitt D. Periodic Comet Schwassmann- Wachmann 1.- IAU Circular No. 5692, 1993.
137. Иванова А.В., Афанасьев В.Л., Корсун П.П., Баранский А.Р., Андреев М.В., Пономаренко В.А. Определение периода вращения кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 по пылевым структурам (джетам) в коме//Астрон. вестник. – 2012. – Т. 46. -№ 4. – С. 333 – 339.
138. Whipple F.L. Rotation and outbursts of comet P/Schwassmann-Wachmann 1//Astron. J. – 1980. V. 85. – P. 305 – 313.
139. Wyckoff S. Overview of comet observations//Comets. (A83-13376 03-90) Tucson, AZ, Univ. of Ariz. Press. – 1982. – P. 3 – 55.
140. Иванова А.В., Корсун П.П., Афанасьев В.Л. Фотометрические исследования удаленных комет C/2002 VQ94 (LINEAR) и 29P/Швассмана-Вахмана 1//Астрон. вестник. – 2009. Т. 43. - № . - С. 470 – 480.
141. Ivanova O. V., Luk'yanyk I. V., Kiselev N. N. et., al. Photometric and spectroscopic analysis of Comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 activity// Planet. Space Sci. – 2016. – Vol. 121. – P. 10 – 17.
142. Trigo-Rodriguez J.M. et al. Outburst activity in comets I. Continuous monitoring of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1//Astron. and Astrophys. – 2008. – V. 485. – P. 599 – 606.
143. Froeschle Cl., Klinger J., Rickman H. Thermal models for the nucleus of comet P/Schwassmann-Wachmann 1. - In: Asteroids, comets, meteors; Proceedings of

- the Meeting, Uppsala, Sweden, June 20-22, 1983 (A85-26851 11-89). Uppsala, Sweden, Astronomiska Observatoriet, 1983, p. 215-224.
144. The International Astronomical Union – Minor Planet Center. MPEC 2017-T14. URL: <https://www.minorplanetcenter.net/mpec/K17/K17T14.html> Дата обращения 5.10.2017.
 145. The International Astronomical Union – Minor Planet Center. MPEC 2016-V116. URL: <https://www.minorplanetcenter.net/mpec/K16/K16VB6.html> Дата обращения 15.10.2017.
 146. Henden, A.A., Templeton, M., Terrell, D., Smith, T.C., Levine, S., Welch, D., 2016. VizieR Online Data Catalog: AAVSO Photometric All Sky Survey (APASS) DR9 (Henden+, 2016). VizieR Online Data Catalog 2336
 147. Stansberry J.A. et al. Spitzer Observations of the Dust Coma and Nucleus of 29P/Schwassmann-Wachmann 1//The Astrophys. J. Sup. Ser. – 2004. – Vol. 154. – P. 463 – 468.
 148. Berman L., Whipple F.L. Notes on Comet J 1927//Public. of the Astron. Soc. of the Pacific. - 1928a. – Vol. 40. – P. 34.
 149. Berman L., Whipple F.L. Elements and ephemeris of Comet J 1927 (Schwassmann-Wachmann)//Lick Observ. Bull. 394, Univ. of California Press. 1928b. – P. 117-119.
 150. Miles R., Faillace G. A., Mottola S., et al. Anatomy of outbursts and quiescent activity of Comet 29P/Schwassmann-Wachmann//Icarus. – 2016. – Vol. 272. – P. 327 – 355.
 151. Picazzio E., Luk'yanyk I.V., Ivanova O.V., et., all. Comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 dust environment from photometric observation at the SOAR Telescope//Icarus. – 2019. – Vol. 319. – P. 58 – 67.
 152. 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.

153. Samarasinha N.H., Larson S.M. Image enhancement techniques for quantitative investigations of morphological features in cometary comae: a comparative study//Icarus. – 2014. – Vol. 239. – P. 168 – 185.
154. Masiero J., JPL/Caltech, URL: <https://echo.jpl.nasa.gov/asteroids/2014JO25.-2017>, pers.comm Дата обращения 08.12.2017.
155. NEODyS-2 – Near Earth Objects –Dynamic Site, URL: <http://newton.dm.unipi.it/neodys> Дата обращения 08.12.2017.
156. Binary and ternary Near-Earth asteroids detected by radar. URL: <http://echo.jpl.nasa.gov/~lance/binary.neas.html>, Дата обращения 08.12.2017
157. Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Петрова С.Н., Башакова Е.А., Львов В.Н., Цекмейстер С.Д., Русов С.А., Иванов А.В., Вершков А.Н., Мартюшева А.А., Барабанов С.И., Ерофеев Д.В., Кохирова Г.И., Хамроев У.Х., Буриев А.М. Базисные наблюдения потенциально опасных астероидов в 2017 году//Экологический вестник научных центров ЧЭС. – 2017. -№ 4, вып.3. – С. 24 – 31.
158. Warner B.D. Initial Results from a Dedicated HG Project // Minor Planet Bulletin. – 2007. –Vol. 34. -№ 4. – P. 113–119.
159. Чубей М.С., Львов В.Н., Ягудин Л.И. Оценка точности астрометрических измерений в условиях космической стереоскопической обсерватории. В сб.: Четвертые Поляховские Чтения. Избранные труды. СПб. Изд-во “ВВМ”. – 2006. –С. 288–295.
160. Кохирова Г.И., Девяткин А.В., Хамроев У.Х., Буриев А.М., и др. Наблюдения потенциально опасного астероида 2014JO25 в Таджикистане//ДАН РТ. – 2017. –Т. 60. - №10. –С. 490-501.
161. Jewitt D. Properties of near-Sun asteroids//The Astron. Journal. – 2013. – Vol. 145. -№. 5. – P. 133-139.
162. Harris A.W. On the Slow Rotation of Asteroids//Icarus. – 2002. – Vol. 156. - № 1. – P. 184–190.

163. Homepage of Period04 (computer program). URL: <http://www.univie.ac.at/tops/Period04> Дата обращения 08.12.2017.
164. Goldstone Radar Observations Planning. URL: <http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K07/K07W46.html> Дата обращения 08.12.2017.
165. Warner B.D. Near-Earth Asteroid Light curve Analysis at CS3-Palmer Divide Station, 2016 July–September//Minor Planet Bul. – 2017. - № 44. – P. 22–36.
166. Warner B.D. “Near-Earth Asteroid Light curve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: April thru June” Minor Planet Bull. – 2017b. – Vol. 44. – P. 235-244.
167. Mainzer A., Bauer J., Grav T. et., al. Preliminary design of the Wide-Field Infrared Survey Explorer (WISE). – UV/Optical/IR Space Telescopes: Innovative Technologies and Concepts II. Edited by MacEwen, Howard A. Proceedings of the SPIE. – 2005. – Vol. 5899. – P. 262-273.
168. The International Astronomical Union – Minor Planet Center. URL: https://minorplanetcenter.net/db_serch/show_object?utf8=%E2%9C%93&object_id=418094 Дата обращения 08.10.2019.

ПРИЛОЖЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АПЕКС – программная система для обработки ПЗС – изображений
АСЗ – Астероид, сближающийся с Землей
ГАО – Главная астрономическая обсерватория (Пулковская) РАН
ГисАО – Гиссарская астрономическая обсерватория
ИА АН РТ – Институт астрофизики Академия наук Республики Таджикистан
ИКИ РАН – Институт космических исследований Российской академии наук
ИНАСАН – Институт астрономии РАН
КПП – Кометы главного пояса
МАОС – Международная астрономическая обсерватория Санглов
ПЗС – Прибор с зарядовой связью
ПОА – Потенциально опасный астероид
ПП – программный пакет
РАН – Российская академия наук
СНГ - Содружество Независимых Государств
США – Соединенные Штаты Америки
ЭПОС – Эфемеридная Программа для Объектов Солнечной системы
ALCDEF – Asteroid Lightcurve Data Exchange Format
APASS – AAVSO Photometric All-Sky Survey
CCD – Charge-Coupled Device
DAMIT – Database of Asteroid Models from Inversion Techniques
FLI – Finger Lakes Instrumentation
FOV – Field of view
FWHM – Full Width at Half Maximum
IAU – International Astronomical Union
JD – Julian date

JFC – Jupiter Family Comets

JPL – Jet Propulsion Laboratory

KBO – Kuiper belt objects

LPC – Long period comets

MPC – Minor planet center

MPEC – Minor Planet Electronic Circulars

NAIC – National Astronomy and Ionosphere Center

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NEODyS – Near Earth Objects Dynamic Site

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

PSF - Point Spread Function

UT – Universal Time