



УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора ГЕОХИ РАН

д.г.-м.н.

О. А. Луканин

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН» на диссертацию Анварджона Махмадалиевича Буриева «Исследование динамических и физических особенностей избранных комет и астероидов по данным оптических наблюдений», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.01 - «астрометрия и небесная механика»

Работа А.М. Буриева посвящена исследованию динамических и физических характеристик избранных короткопериодических комет и околоземных астероидов по данным наблюдений в оптическом диапазоне.

Актуальность диссертационной работы не вызывает сомнений. Кометное вещество в значительной степени сохранило в своем составе первичное протосолнечное вещество, поэтому кометы являются по существу единственным источником знаний о нем. Кроме того, в его состав входят тугоплавкие компоненты, которые могли образоваться только вблизи Солнца, что говорит об интенсивных процессах радиального транспорта газопылевого вещества диска не только к центру, но и от него на ранних этапах эволюции Солнечной системы. Исследования околоземных астероидов, помимо прикладного значения как объектов астероидной опасности, важны поскольку вещество внутренних планет, в том числе и Земли, на заключительном этапе своего формирования аккрецировало некоторую часть вещества астероидного пояса, где образовались и околоземные астероиды. Таким образом, исследование астероидов и комет, в особенности их химического состава и строения, имеет большое значение для космогонии и космохимии.

В основу диссертации положены оригинальные данные оптических наблюдений короткопериодических комет 17P/Холмса, 41P/Туттля - Джакобини – Кресака и 29P/Швассмана- Вахмана 1, а также потенциально опасных астероидов 2014 JO25 и 418094 (2007 WV4), полученные А.М. Буриевым.

Научная новизна представленной работы заключается в том, что данные проведенных автором оптических наблюдений, а также астрометрической и фотометрической обработки полученных изображений космических объектов позволили определить момент деления ядра кометы 17P/Холмса, скорость разлета фрагментов, вычислить орбиту кометы после деления ядра. Были также определены координаты,

орбиты, звездные величины, кривые блеска, эффективный диаметр ядра, показатели цвета комет 41P/Туттля - Джакобини – Кресака и 29P/Швассмана-Вахмана 1. Определены координаты и орбиты потенциально опасных астероидов 2014 JO25 и 418094 (2007 WV4), построена первоначальная орбита астероида 2014 JO25 и выполнено ее улучшение.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Объем работы составляет 162 страницы. Она содержит 29 рисунков и 58 таблиц. Список литературы включает 168 наименований.

Во **Введении** работы даны определения объектов исследования, обоснована актуальность темы, определены основные цели представленной работы и пути их достижения, сформулированы основные положения, вынесенные на защиту, отмечена научная новизна полученных результатов и их практическая значимость. Сформулирован личный вклад автора, который представляется весьма значительным. Отмечается, что результаты работы доложены на многих конференциях и опубликованы в 12 научных статьях, в том числе в двух статьях, индексируемых Web of Science и Scopus.

В **первой главе** рассмотрены оптические методы наблюдений комет и астероидов, являющихся главными объектами изучения Института астрофизики Академии наук Республики Таджикистан, изложена методика астрометрической обработки их изображений, приведены методы определения координат и вычисления элементов орбит этих объектов. Дано краткое описание метода фотометрической обработки изображений комет и астероидов, определения звездных величин и других физических параметров объектов наблюдений. Приведены результаты анализа точности при обработке астрометрических наблюдений с помощью двух известных программных пакетов. Обоснован вывод, что программный пакет АПЕКС II для обработки изображений обеспечивает лучшую точность получаемых положений объектов, чем программный пакет Astrometrica.

Значительное место уделено описанию динамических, физических и некоторых других характеристик рассматриваемых в работе объектов - короткопериодических комет 17P/Холмса, 41P/Туттля - Джакобини – Кресака и 29P/Швассмана- Вахмана 1, а также потенциально опасных астероидов 2014 JO25 и 418094 (2007 WV4). Анализируя их особенности, автор справедливо отмечает, что принятый критерий разделения астероидов и комет, основанный только на их динамических свойствах (постоянная Тиссерана), не всегда корректен, например, когда речь идет о недавно открытых «кометах Главного пояса астероидов», или «угасших» кометах, расположенных в околоземном регионе.

В качестве замечаний к тексту Введения и Главы I можно указать следующее.

1. Происхождение комет семейства Юпитера, согласно современным представлениям, связано в основном не с поясом Койпера (с. 4), а с так называемым рассеянным диском (*scattered disc*).
2. Определение кометы как «физическое явление» (стр. 27) представляется неудачным, скорее это физическое или космическое тело.
3. «Отношение содержания пыли к газу в кометных ядрах составляет примерно 1:3», указанное на стр. 27, не соответствует современным представлениям и, хотя на этот

счет существуют лишь оценки, $M_{\text{dust}}/M_{\text{ice}}$, определенно >1 (см., например, Moreno et al., 2016).

4. Тезис «Сравнение объектов (комет) из трех резервуаров позволяет изучить протопланетный диск Солнца в трех местах» (стр. 29) представляется несколько сомнительным, в особенности сопоставление вероятных температур в описываемых регионах околосолнечного газопылевого диска и температур образования кометных ядер, принадлежащих в данный момент тому или иному резервуару. Если говорить о минимальной температуре, при которой происходила аккумуляция, то наилучшим образом ее можно охарактеризовать составом наиболее летучих льдов в их ядрах, о чем судят по составу кометных ком. Имеющиеся на сегодняшний день экспериментальные данные **не позволяют говорить о разном составе высоколетучих льдов в кометах разных динамических типов**, включая наиболее летучие компоненты (см., например, *Dello Russo et al.*, 2016). Кроме того, состав ядер комет Главного астероидного пояса в настоящее время вообще неизвестен.
5. Современные экспериментальные данные, в том числе результаты космического эксперимента «Розетта-Филы» по исследованию кометы 67P/Чурюмова-Герасименко, не дают оснований однозначно считать, что «подавляющее большинство эллиптических комет являются фрагментами, образовавшимся в результате столкновений объектов пояса Койпера» (стр. 30). Подробно этот вопрос исследуется в недавно опубликованной статье (Weissman, P., Morbidelli, A., Davidsson, B. *et al.* Origin and Evolution of Cometary Nuclei. *Space Sci Rev*, **216**, 6, 2020).
6. Исследование возможных корреляций физических свойств кометных ядер с местом их происхождения и последующей историей декларировано как «одна из целей данного исследования» (стр. 30), результаты которого не отражены ни в самой работе, ни в ее результатах и выводах.
7. Вызывает удивление тот факт, что диссертант, подробно описывая достижения в наземных наблюдениях астероидов, не упомянул о результатах их исследований с помощью космических миссий, которые проводятся в последние 20 лет. Начало было положено с исследований астероида Эрос (зонд NEAR Shoemaker, 2001 г.), затем Итокава (КА "Хайябуса", в 2005 г. вещество доставлено на Землю), Рюгу (КА Hayabusa-2, возвращение собранных образцов на Землю планируется в декабре 2020 г.), активный астероид Бенну (OSIRIS-REx, НАСА, образцы грунта планируется доставить на Землю). Астероиды принадлежат к разным классам, образцы их грунта доставляются, или в ближайшее время будут доставлены на Землю для исследования в лабораторных условиях.

Во второй главе представлены результаты наблюдений короткопериодических комет семейства Юпитера (JFCs) 17P/Холмса, 41P/Туттля - Джакобини – Кресака и 29P/Швассмана- Вахмана 1.

В разделе 2.1. представлен обзор результатов наблюдений кометы 17P/Холмса с конца XIX-го века. Отмечается, что прохождение кометой перигелия (~2 а.е.), неоднократно сопровождалось мощными вспышками, а в октябре 2007 г. вспышка сопровождалась делением ядра с образованием множества фрагментов. Этот процесс,

наряду с другими обсерваториями мира, наблюдался и в Гиссарской астрономической обсерватории Института астрофизики АН РТ с участием диссертанта. Используя результаты 208 наблюдений ГисАО, А.М. Буриев получил значения элементов первоначальной орбиты кометы, показавшие удовлетворительное согласие с данными MPC (Minor planet center) (таб. 2.3). Им также была оценена скорость разлета одного из образовавшихся фрагментов, которая, по мнению автора, оказалась слишком высока (107 ± 35 м/с), чтобы объяснить наблюдаемую вспышку только активизацией процессов сублимации льдов. Полученные автором оценки согласуются с данными других авторов.

Анализируя возможные механизмы деления ядра, и принимая во внимание высокую скорость разлета фрагментов кометы 17P/Холмса, автор высказывает предположение, что с большой долей вероятности причиной деления ядра кометы 17P/Холмса явилось столкновение с небольшим астероидным телом или крупным метеороидом, которое не было катастрофическим и не привело к изменению орбиты кометы.

Был ли удар единственной причиной разрушения ядра, или это был комплекс причин, однозначно сказать сейчас нельзя, но следует вспомнить, что само открытие кометы 17P Э. Холмсом произошло благодаря аналогичной по яркости вспышке в 1892 г. Однако и вероятность соударения ядра кометы с иным телом не нулевая, о чем, например, может свидетельствовать тот факт, что на поверхности ядра кометы 67P/Чурюмова-Герасименко в области Ash был обнаружен ударный кратер диаметром 35 м и глубиной 9 м (Thomas N., Sierks H. et al. The morphological diversity of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko // Science. 2015. V. 347 (6220), aaa0440). Поэтому предположение об ударном разрушении кометы 17P/Холмса, высказанное автором, кажется нам вполне допустимым.

В разделе 2.2. подробно описаны результаты оптических наблюдений кометы семейства Юпитера (JFC) 41P/Туттля - Джакобини – Кресака в период ее тесного сближения с Землей, в которых принимал участие автор. По результатам наблюдений А.М. Буриевым были определены параметры орбиты кометы 41P (Таб. 2.10), которые находятся в хорошем согласии с данными MPC. Многоцветные наблюдения в ГисАО позволили диссертанту определить звездные величины кометы, построить кривые блеска, а также определить показатели цвета ядра кометы 41P, которые подтвердили сдвиг спектра отражения в красную область. Такой сдвиг характерен для всех каменно-ледяных тел, образовавшихся в транснептуновом регионе, и свидетельствует о присутствии на их поверхности сложных органических соединений с высоким относительным содержанием углерода. Диссертантом был также оценен фотометрический диаметр ядра кометы, который оказался более чем в 3 раза выше предшествующих оценок 1.4 км (Таб. 2.14). Учитывая сложность задачи, очевидно, что окончательно ответить на этот вопрос можно будет лишь, проведя наблюдения кометы в период ее малой активности, что вероятнее всего возможно лишь с помощью космических телескопов.

Раздел 2.3. посвящен изложению результатов наблюдений кометы семейства Юпитера (JFC) 29P/Швассмана-Вахмана 1, которые проводились в МАОС в период вспышечной активности 2017-го года. Комета 29P интересна тем, что она обладает кометой активностью, но по динамическим характеристикам ее можно отнести к классу кентавров - ее орбита близка к круговой со средним гелиоцентрическим расстоянием 6 а.е. А.М. Буриевым были определены видимые и абсолютные звездные величины кометы, что

в сочетании с литературными данными по возможному значению величины геометрического альbedo, позволило автору получить оценку интервала значений диаметра объекта. Он оказался весьма широким – от 40 до 104 км, и как справедливо отмечает диссертант, чтобы его сузить, необходимо более точно определить альbedo кометы 29P. Отметим, однако, что в работах некоторых авторов указывались несколько меньшие оценки размера ядра кометы 29P, которые в диссертации не упоминаются. Например, *Meech et al.*, 1993 получили радиус кометы $r_n = 15.4 \pm 0.2$ км для альbedo $A = 0.04$, а для $A = 0.13$ $r_n = 8.6 \pm 0.1$ км.

Помимо этого, А.М. Буриевым была исследована морфология комы кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1, в которой были выявлены две пылевые структуры, направленные в сторону Солнца и от него. Показатель цвета указывает, что в коме кометы преобладает пылевая компонента, включающая силикаты и тугоплавкие органические соединения. Особенность объекта состоит в том, что его активность происходит на достаточно больших гелиоцентрических расстояниях ~ 6 а.е., где сублимация основного летучего компонента комет – льда воды невозможна. Автор обосновывает тезис, что причина наблюдаемой вспышки связана с интенсивным выбросом газа CO, который может высвободиться в результате кристаллизации аморфного льда в поверхностном слое ядра кометы. Это предположение, впервые высказанное D.Jewitt (*The active centaurus//The Astronomical J.*, 137:4296–4312, 2009) и развитое затем в работах A. Guilbert-Lepoutre (*Survival of Amorphous Water Ice on Centaurs // The Astronomical J.*, V.144, Issue 4, article id. 97, 2012), представляется вполне обоснованным. В литературе высказывалось также предположение, что изменение аморфной структуры льда воды на кристаллическую, сопровождающееся выделением тепла, возможно является причиной внезапных вспышек активности таких комет, как 1P/Halley, 67P/C-G и др.

Из представленного в Главе 2 материала следует, что автор провел большой объем наблюдений, а сравнение полученных результатов с имеющимися литературными данными говорит об их высоком научном уровне.

В третьей главе автором изложены результаты исследований динамических и физических свойств астероидов, сближающихся с Землей и классифицированных как потенциально опасные объекты. Приведены результаты квазисинхронных наблюдений астероидов 2014 JO25 и (418094) 2007 WV4 на основе короткого промежутка наблюдений. Наблюдения проводились пятью обсерваториями РАН и двумя обсерваториями ИА АН РТ – Международной астрономической обсерваторией Санглох (МАОС) и Гиссарской астрономической обсерваторией (ГисАО). Сделан вывод о том, что при имеющейся точности астрометрических наблюдений для построения орбиты параллактический угол должен составлять не менее 10 угловых минут, а продолжительность совместных наблюдений двух обсерваторий должна быть не менее одного часа. Вычисленная по данным квазисинхронных наблюдений орбита астероида 2014 JO25 соответствует орбите MPC. Видимая скорость движения астероида (418094) 2007 WV4 в момент наибольшего сближения с Землей достигала сотен угловых секунд в минуту. Это сильно затруднило наблюдения и их обработку. Кроме того, промежуток общих наблюдений был всего около получаса. Поэтому вычислить орбиту достаточной точности по квазисинхронным наблюдениям не удалось. Орбита этого астероида была вычислена на основе наблюдений

в ГисАО, и результат соответствовал орбите MPC.

Приведены результаты фотометрической обработки и определения физических свойств астероидов 2014 JO25 и (418094) 2007 WV4. Сделано предположение о принадлежности астероида 2014 JO25 к классам G, V или Q. По наблюдениям определен диаметр (1 км) и период вращения этого астероида (5.5 ч). Оценка диаметра (0.72-0.89 км) астероида (418094) 2007 WV4 также согласуется с данными предыдущих работ.

Основные результаты диссертации. Проведенные А.М. Буриевым астрономические наблюдения позволили ему получить ряд важных результатов.

Определены координаты и вычислены орбиты комет 17P/Холмса, 41P/Туттля - Джакобини – Кресака и 29P/Швассмана- Вахмана 1. Определены звездные величины, кривые блеска, эффективный диаметр ядра, показатели цвета комет 41P и 29P. Мониторинг кометы 29P проведен в период ее вспышечной активности. Выброс нейтрального газа CO вследствие кристаллизации аморфного льда на поверхности ядра кометы 29P рассмотрен как один из наиболее вероятных механизмов, ответственных за кометную активность на больших гелиоцентрических расстояниях. Показано, что сближение кометы 41P с Землей на минимальное расстояние не повлияло на стабильность орбиты кометы.

Исследованы условия деления ядра кометы 17P/Холмса, определены скорость разлета фрагментов и момент деления ядра. Полученная оценка скорости (около 100 м/с) и ее сопоставление со скоростями, обусловленными различными механизмами деления ядра, дало автору основание предположить, что причиной деления ядра кометы 17P/Холмса и, как следствие, вспышки блеска, явилось столкновение кометы с другим космическим объектом, а не активизация процессов сублимации льдов. Вычислена орбита кометы 17P после деления ядра и показано, что она сохранила стабильность, следовательно, столкновение не было катастрофическим, и не привело к изменению элементов орбиты.

Определены координаты и орбиты потенциально опасных астероидов 2014 JO25 и 418094 (2007 WV4) с использованием данных квазисинхронных наблюдений 6 обсерваторий (в том числе Гиссарской обсерватории и обсерватории Санглох Института астрофизики АН РТ) на основе короткого промежутка наблюдений. Показана эффективность проведенной кампании квазисинхронных наблюдений астероидов для определения координат и вычисления орбит. Для астероида 2014 JO25 удалось этим методом построить орбиту, сравнимую по точности с орбитой, опубликованной MPC.

Определены физические особенности астероидов 2014 JO25 и 418094 (2007 WV4): видимые и абсолютные звездные величины, кривые блеска, период вращения, эффективный диаметр, показатели цвета и предположительная минералогия, проведен анализ и интерпретация результатов. На основе найденных показателей цвета и таксономической классификации впервые предложен минералогический состав астероида 2014 JO25. По предварительным оценкам период вращения этого астероида равен 5.5 часа.

Выполнен сопоставительный анализ точности астрометрической обработки изображений с использованием различных программных пакетов. Значительно улучшено качество и точность определения координат и звездных величин объектов, благодаря впервые внедренному в Институте астрофизики АН РТ программному пакету АПЕКС-II для астрометрической и фотометрической обработки изображений объектов. Показана приемлемая точность астрометрических измерений, полученная вследствие адаптации и

внедрения программного пакета АПЕКС-II для астрометрии (и фотометрии) изображений объектов.

С помощью телескопа Цейсс-1000, восстановленного и модернизированного в 2016 году, в Международной астрономической обсерватории Санглох Института астрофизики АН РТ впервые выполнены многоцветные наблюдения избранных комет и астероидов, подтверждающие приемлемость использования инструмента для наблюдений малых тел Солнечной системы и пополнения базы данных Центра Малых Планет.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах и на научных республиканских и международных конференциях.

В вычислениях, анализе и интерпретации результатов автору принадлежит равный с соавторами вклад.

Список публикаций по теме диссертации включает 12 работ, из них в журналах из перечня ВАК - 4 статьи, в том числе 2 статьи в изданиях, индексируемых WoS/Scopus.

Представленные результаты являются новыми и полностью отражают поставленные в работе цели. Работа А.М. Буриева выполнена на высоком научном уровне, автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Считаем, что представленная Анварджоном Махмадалиевичем Буриевым диссертационная работа «Исследование динамических и физических особенностей избранных комет и астероидов по данным оптических наблюдений» полностью соответствует специальности 01.03.01 «астрометрия и небесная механика» и требованиям ВАК, а ее автор несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Сделанные замечания имеют цель помочь диссертанту в его будущих исследованиях, но никак не умаляют важность полученных им результатов, которые могут «обеспечить нас сведениями об условиях формирования Солнечной системы», как справедливо отмечает автор (стр. 29).

Главный научный сотрудник, заведующий лабораторией термодинамики и математического моделирования природных процессов ГЕОХИ (Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН; 119991, ГСП-1, Москва В-334, ул. Косыгина, 19)

Доктор химических наук
Дорофеева Вера Алексеевна
dorofeeva@geokhi.ru, тел. 8-495-939-7060



Ведущий научный сотрудник
Лаб. термодинамики и математического моделирования природных процессов ГЕОХИ
Доктор физико-математических наук
Ипатов Сергей Иванович
ipatov@geokhi.ru, тел. 8-926-379-2810



22.07. 2020 г.