

На правах рукописи



ИБРАГИМОВ АЛИШЕР АБДУЛЛОХОДЖАЕВИЧ

АБЕРРАЦИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ХВОСТОВ И ИОНИЗАЦИЯ
ПОВЕРХНОСТИ ЯДЕР КОМЕТ
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

1.3.1. – Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2024

Работа выполнена в Институте астрофизики НАН Таджикистана.

Научный руководитель: д.ф.-м.н., член-корреспондент НАН
Таджикистана Кохирова Гулчехра Исроиловна

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., с.н.с. Киселев Николай Николаевич,
главный научный сотрудник ФГБУН
«Крымская астрофизическая обсерватория
Российской академии наук»

к.ф.-м.н. Хабарова Ольга Валерьевна, ведущий
научный сотрудник ФГБУН Института
земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
Российской академии наук

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет», г. Санкт-
Петербург

Защита состоится 16 апреля 2024 года в 11:00 на заседании диссертационного
совета 24.1.032.01 при Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук по
адресу: 119017, г. Москва, ул. Пятницкая, д. 48.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Института
астрономии РАН и на сайте <http://www.inasan.ru/>

Автореферат разослан «11» марта 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.032.01,

к.ф.-м.н. Чупина Наталия Викторовна



Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена исследованию взаимодействия солнечного ветра (СВ) с плазменным хвостом и с ледяной поверхностью ядра кометы. В работе рассмотрены следующие вопросы: измерение кометоцентрических координат, вычисление погрешностей и поиск условий увеличения точности измерений; определение скорости СВ по наблюдениям комет и сравнение результатов с данными космических аппаратов (КА), выявление причин отличия и условий их соответствия; вклад бомбардировки поверхности ядра кометы протонами солнечного ветра в ионизацию кометных молекул.

Актуальность темы

Актуальностью исследования солнечно-кометного взаимодействия является возможность:

- определения параметров межпланетной среды на больших интервалах гелиорасстояний и гелиоширот с использованием наблюдений комет;
- прогноза геомагнитной возмущенности, которая зависит и от параметров солнечного ветра;
- изучения физических процессов, которые еще не реализованы в земных лабораторных условиях;
- уточнения модели гелиосферы, которая является одной из важнейших задач космофизики.

Цель и задачи диссертационной работы

- Измерить кометоцентрические координаты точек оси хвоста изображения комет, полученных по наблюдениям на телескопе АЗТ-8 Гиссарской астрономической обсерватории Института астрофизики Национальной академии наук Таджикистана (ГисАО ИА НАНТ). Для достижения первой цели исследования были поставлены следующие задачи:

разработать алгоритм определения кометоцентрических координат при перспективном проектировании по методу Штумпфа, вычислить угол отклонения оси плазменного хвоста кометы относительно продолженного радиус-вектора (абerrация).

- Оценить возможность применимости метода определения скорости СВ по абerrации плазменного хвоста кометы. Для достижения данной цели настоящей работы были поставлены следующие задачи: определить значения скорости СВ по измеренным углам абerrации наблюдаемых комет, выполнить сравнительный анализ с данными КА.
- Уточнить действие бомбардировки корпускулярным потоком СВ поверхности ядра кометы как источника ионообразования в кометах. Для достижения данной цели исследования были поставлены следующие задачи: определить коэффициент ионно-ионной эмиссии с ледяной поверхности в диапазоне энергии СВ, определить количество образующихся ионов, сравнить с данными КА.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Соответствие прямоугольных и экваториальных координат на изображении кометы уменьшает объем математических действий при перспективном проектировании по методу Штумпфа. Показано, что при использовании телескопа с экваториальной монтировкой и малым угловым полем обзора (например, $45' \times 45'$) увеличивается точность измерения кометоцентрических координат и исключается необходимость нанесения сетки экваториальных координат на изображение.

2. Наблюдения плазменных хвостов комет могут быть применены для определения скорости солнечного ветра с учетом дополнительного смещения оси плазменного хвоста кометы. Показано, что

а) непериодические колебания оси плазменного хвоста длительностью до 2-х суток связаны с тангенциальной компонентой СВ;

б) заниженные значения скорости, определенных по абберации плазменных хвостов, относительно данных КА связаны с действием солнечной гравитации.

Количественная оценка учета действия тангенциальной компоненты СВ и гравитации Солнца, позволяют привести в соответствие скорости солнечного ветра, определенные по наблюдениям комет и измеренные космическими аппаратами.

3. Взаимодействие солнечного ветра с поверхностью ядра кометы возможно при разряженной атмосфере и отсутствии у последней ионосферы. Определены коэффициенты ионно-ионной эмиссии при бомбардировке льда протонами СВ. Вычислены скорости ионообразования с ледяной (H_2O+CO_2) поверхности кометного ядра под действием СВ на расстоянии 3 а.е.

4. Бомбардировка протонами СВ вносит существенный вклад как механизм ионизации на начальных этапах ионообразования в кометах. Показана доминирующая степень ионизации при ионном распылении ледяной поверхности ядра кометы с разряженной атмосферой на больших гелиоцентрических расстояниях (>3 а.е.).

Научная новизна

1. Впервые в метод перспективного проектирования Штумпфа внедрено условие повышения точности определения углов проектирования, вследствие чего упрощены измерения кометоцентрических координат.

2. Получено новое соотношение, учитывающее вклад тангенциальной составляющей скорости СВ и радиальной скорости кометы в определении угла абберации кометного хвоста.

3. Впервые определены значения скорости солнечного ветра по абберации плазменных хвостов комет C/2012 S1 (ISON), C/2014 Q2 (Lovejoy) и C/2019 Y4 (ATLAS) на соответствующие даты наблюдений.

4. Разработана новая методика вычисления тангенциальной скорости СВ с учетом теоретических и экспериментальных данных.

5. Впервые получено выражение, учитывающее поперечное действие сил на плазменный хвост кометы

6. Установлено, что воздействие тангенциальной составляющей СВ и солнечная гравитация на плазменный хвост кометы является причиной несоответствия теоретических результатов и прямых измерений скорости СВ.

7. Впервые получены коэффициенты ионной эмиссии при бомбардировке ледяной поверхности кометы протонами солнечного ветра.

8. Впервые определено количество ионов, распыленных с ледяной поверхности ядра кометы корпускулярным потоком солнечного ветра на расстоянии 3 а.е.

9. Впервые показана эффективность бомбардировки корпускулярного потока солнечного ветра как механизма ионизации кометных молекул на начальных этапах ионообразования.

Теоретическая и практическая значимость

Кометы являются ключевыми объектами, изучение которых способствует формированию наших знаний о Солнечной системе, ее образовании и эволюции, а также о фундаментальных плазменных процессах, происходящих как в Солнечной системе, так и за ее пределами.

Исследования, проведенные в диссертационной работе по ориентации плазменных хвостов комет, показывают, что кометы могут применяться в качестве зондов для определения параметров СВ в различных областях межпланетной среды.

Моделирование взаимодействия протонов СВ с поверхностью ядра кометы можно применить и к другим объектам Солнечной системы.

Результаты исследования важны в постановке новых задач при изучении процессов воздействия Солнца на космические объекты.

Достоверность

Достоверность основывается на фактическом наблюдательном материале, использовании признанных международных баз данных КА, сопоставлении полученных значений скорости СВ по наблюдению комет с данными измерений скорости СВ с помощью КА, сравнении модели взаимодействия солнечного корпускулярного потока с ледяной поверхностью кометы с данными миссии «Rosetta» к комете 67P/Churyumov-Gerasimenko, использовании апробированных методов и подходов.

Апробация

Основные результаты работы докладывались на семинарах «Малые тела Солнечной системы» Института астрофизики НАН Таджикистана и Института астрономии РАН (ИНАСАН), г. Москва, а также были представлены на научных республиканских и международных конференциях:

- «Современные проблемы астрофизики», посвященной 100-летию академика О.В. Добровольского, 13 декабря 2014 г., Институт астрофизики НАНТ, г. Душанбе;

- «40 Научная ассамблея COSPAR», 2-9 августа 2014 г., Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва;

- «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса», 16-20 ноября 2015 г., Институт космических исследований РАН, г. Москва;

- X Международная конференция «Околоземная астрономия», приуроченная к 60-летию запуска первого спутника Земли, 2-6 октября 2017, п. Агой, Краснодарский край, РФ;

- «Современные проблемы астрофизики», посвященная 90-летию академика НАНТ П.Б. Бабаджанова, 15 ноября 2019 г., Институт астрофизики НАНТ, г. Душанбе;

- «Околоземная астрономия», 14 апреля 2022 г., Институт астрономии РАН, г. Москва, онлайн;

- 54th Lunar and Planetary Science Conference, 13 - 17 марта 2023 г., Houston, USA;

- International Conference “Asteroids, Comets, Meteoroids”, 18–23 июня, 2023 г., Arizona, USA.

Личный вклад автора

Соискатель в равной степени с другими соавторами участвовал в постановке задач, наблюдениях, астрометрической обработке изображений, разработке методов наблюдений, определении параметров и их исследовании, проведении вычислений, получении и представлении результатов и выводов.

Обсуждение полученных результатов проводилось совместно с научным руководителем, а также с остальными соавторами. Публикации и доклады на конференциях были подготовлены в равных долях с другими соавторами. В наблюдениях, вычислениях, анализе и интерпретации результатов автору принадлежит равный с соавторами вклад.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации составляет 118 страниц, включая 28 рисунков и 21 таблицу. Список литературы включает в себя 132 наименований.

Содержание диссертации

Во Введении обосновывается актуальность, даются определения объекта и предмета исследования, описывается проблема и степень ее изученности, устанавливаются цели и задачи, формулируются основные

положения, выносимые на защиту, кратко описывается содержание диссертации.

В **Главе 1** приводятся существующие методы и модели, которые применяются для описания природы взаимодействия СВ с плазмой кометы. Дается их краткое описание и границы применимости. Рассматриваются точность определения кометоцентрических координат, методы и результаты измерений скорости СВ, а также катодное распыление с поверхности льда протонами СВ. Формулируются проблемы и вопросы, которые являются объектом исследования настоящей работы, а именно: как определяется центр фотометрического ядра, каковы условия совмещения проекции продолженного радиус-вектора с осью координат картинной плоскости, каковы причины эпизодических больших или отрицательных aberrаций плазменного хвоста кометы, каковы причины систематического занижения aberrационных скоростей относительно измеренных с помощью КА, каково количество распыленных ионов под действием СВ. При рассмотрении этих вопросов используются соответствующие литературные источники.

Глава 1 завершается выводами по основным проблемам, исследуемым в диссертационной работе.

В **Главе 2** приведен метод Штумпфа [1] для перспективного проектирования точек изображения на плоскость кометной орбиты с целью определения кометоцентрических координат. Необходимость применения метода перспективного проектирования связана с тем, что вид кометы в картинной плоскости может отличаться от ее форм в плоскости орбиты. Кометоцентрические координаты являются трехмерной системой $(\xi; \eta; \zeta)$, однако существуют исследования [2, 3], указывающие, что плазменные и пылевые хвосты комет лежат в плоскости орбиты ($\zeta=0$). Таким образом, достаточным условием является определение кометоцентрических координат в плоскости кометной орбиты (рис.1).

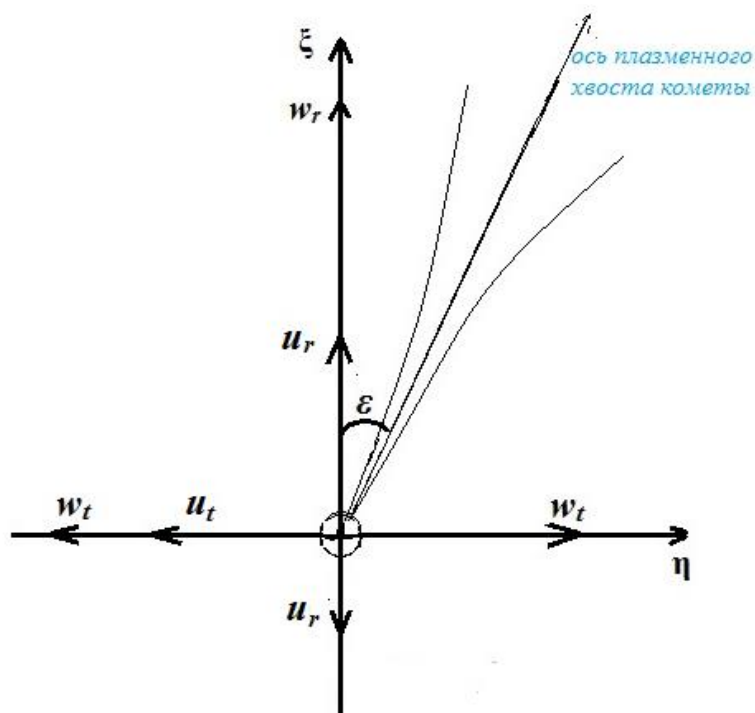


Рис. 1. Кометоцентрические координаты, ось ξ - продолженная линия Солнце-комета, ось η направлена против движения кометы.

С применением данного метода определены кометоцентрические координаты оси плазменного хвоста кометы C/2014 Q2 (Lovejoy) с точностью $\pm 1^\circ.7$. Показан недостаток метода, связанный с неопределенностью положения центра фотометрического ядра ввиду его протяженности. С целью усовершенствования подхода предложено частное решение системы уравнений в методе Штумпфа [1] для определения точки отсчета кометоцентрических координат на изображении кометы. Установлено, что при получении изображения комет телескопами с экваториальной монтировкой и малым углом поля зрения, точность определения кометоцентрических координат значительно возрастает и упрощается вычисление угла совмещения проекции продолженного радиус-вектора с прямоугольными координатами изображения кометы. Так же отпадает необходимость нанесения сетки экваториальных координат на изображение. Показано, что кометоцентрические координаты хвоста кометы C/2014 Q2 (Lovejoy), определенные с применением модифицированного метода Штумпфа, теперь имеет меньшую погрешность $\pm 0^\circ.08$.

При измерении кометоцентрических координат оси хвоста кометы C/2019 Y4 (ATLAS) учитывалось влияние прецессии и собственных движений звезд на точность их определения. Показано, что влияние этих явлений незначительно и ими можно пренебречь.

Как показано в работе [4], угол отклонения относительно продолженного радиус-вектора, называемый также аберрацией оси хвоста (ε), определяемый отношением измеренных кометоцентрических координат ($\operatorname{tg} \varepsilon = \eta/\xi$), способствует определению типа хвоста. Плазменные хвосты комет, обычно, имеют аберрацию (ε) около 10° , а пылевые около 20° [5, 6]. Результаты определения аберраций оси хвоста кометы C/2019 Y4 (ATLAS) по наблюдениям, выполненным автором в ГисАО ИА НАНТ, приведены в табл. 1. Полученные значения аберрации составляют менее 5° , что свидетельствует о плазменной природе наблюдаемого хвоста кометы C/2019 Y4. Плазменная природа наблюдаемого хвоста кометы C/2019 Y4 подтверждается также спектральными наблюдениями в работе [7].

Таблица 1. Угол аберрации оси хвоста кометы C/2019 Y4 (ATLAS) по наблюдениям в апреле 2020 г.

Сутки	ε , градусы
19.6952	4.1 ± 0.3
20.6994	4.4 ± 0.3
21.6652	1.6 ± 0.3
22.7132	3.1 ± 0.3
23.6326	3.4 ± 0.3

Глава 2 завершается основными выводами исследуемых задач данного раздела.

В **Главе 3** определяется радиальная скорость СВ по отклонению плазменных хвостов комет C/2012 S1 (ISON), C/2014 Q2 (Lovejoy) и C/2019 Y4 (ATLAS) по методу Бирмана [8]. Для этой цели использованы изображения комет, полученные по эпизодическим и многосуточным

наблюдениям, выполненным автором в ГисАО ИА НАНТ. Показано, что значение скорости СВ, полученное по эпизодическому наблюдению кометы, часто отличается от данных прямых измерений КА и может дать информацию лишь о характере потока СВ (спокойный, быстрый, спорадический). Значения скорости СВ, определенные по наблюдениям кометы с длительным временным разрешением (более трех суток), показали существование в результатах резкого отклонения отдельной скорости СВ от величины среднего значения (рис. 2).

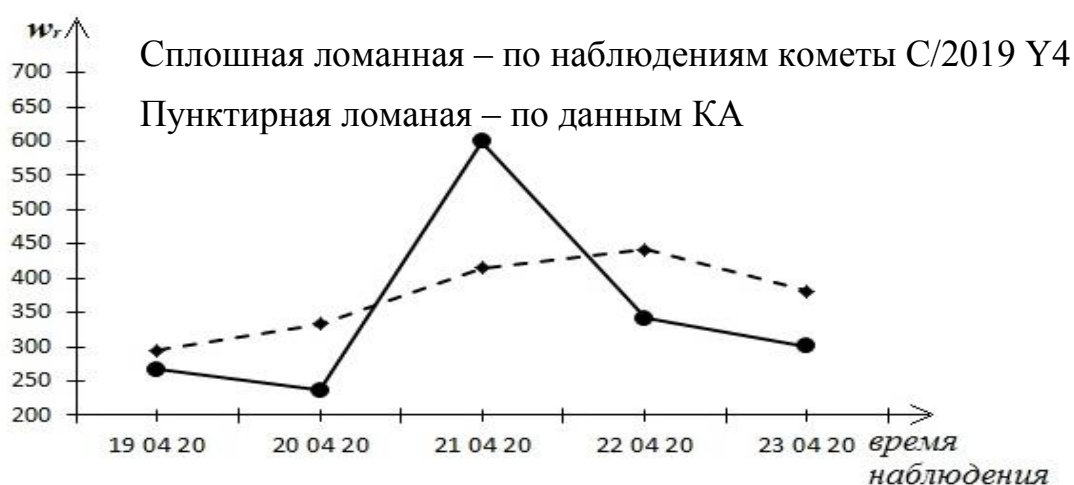


Рис. 2. Скорости СВ, определенные по аберрации хвоста кометы C/2019 Y4 и измеренных с помощью КА.

Показано, что это отклонение обусловлено воздействием тангенциального СВ на плазменный хвост кометы. Указывается, что для определения скорости СВ, как правило, имеющего радиальное направление, необходимо учитывать и тангенциальную составляющую скорости СВ. Найдена количественная оценка вклада тангенциальной составляющей, результаты учета которой представлены на рис. 3.

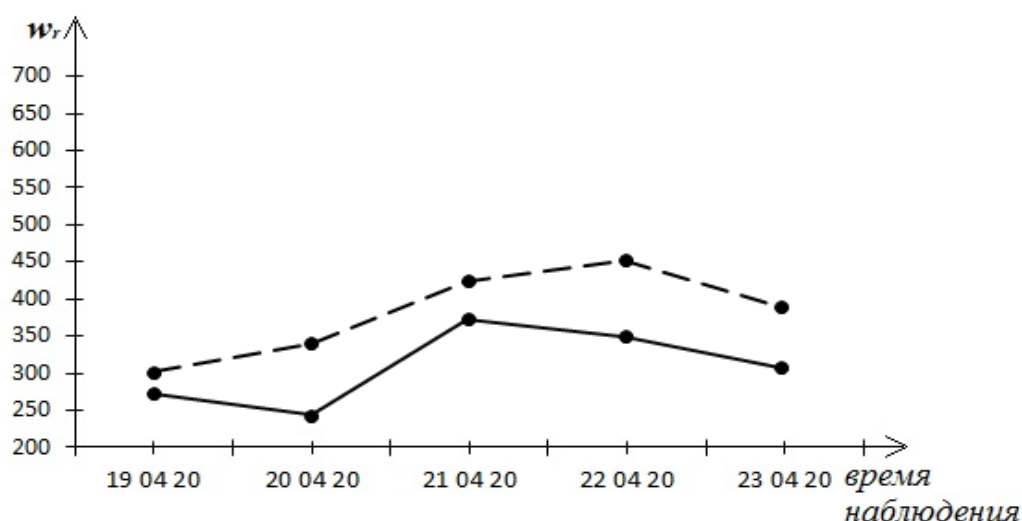


Рис. 3. Скорости СВ, определенные по абберации хвоста кометы C/2019 Y4 с учетом кратковременного воздействия тангенциальной компоненты СВ.

В работе, также, показано действие тангенциальной составляющей СВ, которая предлагается в качестве причины отрицательной абберации плазменных хвостов комет.

Кроме того, в результате сравнения подтверждается систематическое занижение значений радиальной скорости СВ, определяемой по наблюдениям комет относительно данных прямых измерений с помощью КА (рис. 2-3). Данное занижение указывается в работах и других исследователей [9-12]. В диссертации предложено, что данный факт (занижение) обусловлено гравитацией Солнца, которая приводит к дополнительному смещению оси плазменного хвоста кометы. Вычислены пределы смещения оси хвоста комет гравитацией Солнца, которые лежат в диапазоне $1.8^\circ < \Delta\varepsilon < 12.6^\circ$. Учет дополнительного смещения является условием полного соответствия сравниваемых данных.

Глава 3 завершается основными выводами исследования данного раздела.

В Главе 4 рассмотрено моделирование бомбардировки ледяной поверхности ядра кометы протонами солнечного корпускулярного потока и приведены результаты. Вычислены коэффициенты пропорциональности

эмиссии с использованием некоторых данных лабораторных экспериментов [13]. Найденные коэффициенты необходимы для применения лабораторных результатов к солнечно-кометным явлениям. На основе смоделированных коэффициентов ионного распыления определены значения скоростей образования ионов с поверхности льда H_2O+CO_2 на гелиоцентрическом расстоянии 1 а.е. Показано, что максимальная скорость образования положительных ионов составляет $7.56 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$, а для отрицательных ионов $8 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. Найденные скорости образования ионов пересчитаны с учетом параметров СВ на 3 а.е., а затем использованы для нахождения концентрации ионов по известным соотношениям. Для проверки достоверности вычисленных значений концентраций ионов, проведено их сравнение с данными кометы 67P/Churyumov-Gerasimenko, полученными с помощью миссии «Rosetta» на гелиоцентрическом расстоянии 3 а.е. [14, 15]. В табл. 2 во втором и четвертом столбцах приведены смоделированные значения, в третьем и пятом – данные миссии «Rosetta» [14, 15]. Видно, что смоделированные значения скорости образованных ионов и их концентрации хорошо согласуются с наблюдаемыми данными [14, 15]. Небольшие различия скоростей свидетельствуют о наличии в кометах более тяжелых ионов.

Таблица 2. Скорость – u_i и концентрация – n_i ионов на поверхности ядра кометы 67P/Churyumov-Gerasimenko на расстоянии 3 а.е.

Ионы	u_i , км/с	u_i , км/с [15]	n_i , см ⁻³	n_i , см ⁻³ [14, 15]
H_2O^+	87	В среднем 40	0.12	В среднем 0.1
CO^+	70		0.16	
OH^+	89		0.12	

Показано, что вторичная ионная эмиссия составляет лишь небольшую часть (менее 1%) от полного потока частиц, возникающих при ионной бомбардировке льда в твердой фазе. Большая часть вторичных частиц вылетает в нейтральном состоянии. Указывается, что при росте температуры от 120 К до 140 К скорость и плотность сублимировавшихся нейтральных

молекул в околоповерхностном пространстве увеличивается на порядок. Резкое снижение скорости формирования ионов при больших температурах объясняется рассеянием облучения нейтральным вторичным потоком.

Глава 4 завершается основными выводами исследуемых задач данного раздела.

В Заключение кратко сформулированы основные результаты, полученные в ходе исследования, и некоторые рекомендации для дальнейшего исследования по теме диссертационной работы.

В Списке литературы приведены все публикации, использованные в диссертационной работе.

Основные результаты опубликованы в следующих работах.

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК

1. Ибрагимов А.А., Шокириён Ф., Асоев Х.Г., Амиралиев С. Колебания плазменного хвоста кометы C/2019 Y4 (ATLAS) под действием солнечного ветра // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2022. – Т. 65. – № 5-6. – С. 347-351.

2. Шокириён Ф.М., Ибрагимов А.А. Влияние прецессии и собственного движения звезд на точность кометоцентрических координат // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2021. – Т. 64. – № 11-12. – С. 676-681.

3. Ибрагимов А.А. Об ориентации плазменных хвостов комет. // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2021. – Т. 64. – №1-2. – С. 64-70.

4. Ибрагимов А.А. Определение скорости солнечного ветра по наблюдениям плазменных хвостов комет. // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2020. – Т.63. – №5-6. – С. 343-349.

5. Шоёкубов Ш.Ш., Ибрагимов А.А. Динамика образования кластерных ионов в кометах. // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2020. – Т.63. – №9-10. – С. 598-601.

6. Ибрагимов А.А., Шоёкубов Ш.Ш. Образование ионов при бомбардировке ядра кометы протонами солнечного ветра. // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2019. – Т.62. – №11-12. – С. 653-657.

7. Shoyoqubov Shoayub, Shoyoqubov Shohrukh, Ibrohimov Alisher Dynamics and rate of complex ions formation in comets. // Advances in Space Research. – 2015. – V. 56– pp. 2449–2454.

Другие публикации автора по теме диссертации

1. Ибрагимов А. А. Кометоцентрические координаты оси хвоста кометы 67P /Churyumov-Gerasimenko // Научные труды Института астрономии РАН. – 2022. – Т. 7. – № 1. – С. 30-35.

2. Ибрагимов А.А. Определение скорости солнечного ветра по измерениям точек плазменного хвоста кометы C/2019 Y4(ATLAS). // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. – 2021. – №2 (183). – С. 66-71.

3. Ибрагимов А.А., Шоёкубов Ш.Ш., Абдуллоев С.Х., Буриев А.М., Асоев Х. Г. Определение радиальной скорости солнечного ветра по ПЗС наблюдениям плазменного хвоста кометы C/2012 S1 // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2014. – Т.57. – №7. – С. 563-566.

Цитируемая литература

1. Stumpff P. Uber die Projektion von beobachteten Schweifpunkten auf die Ebene der Kometenbahn. // A.N. – 1956– Band 283. – P. 245-248.
2. Mammano A., Wurm K. Investigations concerning the tail axes of comets // Icarus. 1965. Volume 4. Issue 1. Pages 1-7.
3. Belton M. J. S. Some Characteristics of Type II Comet Tails and the Problem of the Distant Comets // Astrophysics Journal. 1965. V. 70. N. 7. 451-466 p.

4. Деменко А.А. О типах хвостов комет: дисс. к. ф-м. н. – Киев. 1965. 237 с.
5. Марочник Л.С. Магнитогидродинамические явления в кометах и связь их с геомагнитными потоками // Успехи физических наук. 1964. 82. с. 221-252.
6. Zolotova N., Sizonenko Yu., Vokhmyanin M., Veselovsky I. Indirect Solar Wind Measurements Using Archival Cometary Tail Observations // Solar Physics. 2018. Volume 293. Issue 5. article id. 85. 14 pp.
7. Hui Man-To, Ye Quan-Zhi Observations of Disintegrating Long-period Comet C/2019 Y4 (ATLAS): A Sibling of C/1844 Y1 (Great Comet) //The Astronomical Journal, Volume 160, Issue 2, id.91.
8. Biermann L. Physical processes in comet tails and their relation to solar activity // La physique des cometes. Louvain. 1953. 251 p.
9. Brandt J. C. Interplanetary gas. XIII. Gross plasma velocities from the orientations of ionic comet tails. // ApJ. – 1967. – <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/ApJ...147..201B>.
10. Belton M. J. S., Brandt J. C. Interplanetary gas. XII. A catalogue of comet-tail orientations -ApJS, 1966, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1966ApJS...13..125B/abstract>.
11. Сизоненко Ю.В. Кометы C/2001 Q4 и C/2004 Q2: структуры плазменных хвостов – Кинематика и физика небесных тел, 2007, т. 23, № 5, с. 286-294.
12. Сизоненко Ю.В. Эволюция хвостов кометы C/2006 M4 (SWAN) – Кинематика и физика небесных тел, 2012, т. 28, № 1, с. 16-24.
13. Хашимов Н.М, Ибадинов Х.И., Шоёкубов Ш.Ш. Масс-спектральное исследование ионного распыления ледяных моделей кометных ядер. - Кометы и метеоры, 1989, №39, с. 29-30.
14. Fuselier S. A., Altwegg K., Balsiger H., Berthelier J. J., Bieler A. et al. Rosetta mission results pre-perihelion Special feature ROSINA/DFMS and IES observations of 67P: Ion-neutral chemistry in the coma of a weakly

outgassing comet. A&A 583, A2 (2015) DOI: 10.1051/0004-6361/201526210

15. Behar E., Nilsson H., Henri P. et al. The root of a comet tail: Rosetta ion observations at comet 67P/Churyumov–Gerasimenko // Astronomy & Astrophysics 616. 2018. A21. p. 1-11.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность и признательность члену-корреспонденту НАН Таджикистана, д.ф.-м. н. Гулчехре Исроиловне Кохировой за обсуждение, редакцию, продвижение и всестороннюю поддержку, как отдельных работ, так и диссертации в целом.

Вместе с тем, автор выражает искреннюю признательность и благодарность академику РАН, д. ф.-м. н. Дмитрию Валерьевичу Бисикало, д. ф.-м. н. Валерию Ивановичу Шематовичу и член-корреспонденту РАН, д.ф.-м.н. Шустову Борису Михайловичу за внимание к работе и за весомые замечания, учет которых значительно улучшил ее научное содержание.

Автор благодарит к.ф.-м. н. Анну Петровну Карташову и к. ф.-м. н. Елену Сергеевну Баканас за интерес к данному исследованию.

Также, автор искренне выражает благодарность (ныне покойным) д. ф.-м. н., профессору Константину Владиславовичу Холшевникову и к. ф.-м. н., доценту Дмитрию Ивановичу Понявину, чьи слова одобрения дали уверенность в продолжении исследования.