

ОТЗЫВ

официального оппонента,
Хабаровой Ольги Валерьевны,
на диссертацию

Ибрагимова Алишера Абдуллоходжаевича

«Аберрация плазменных хвостов и ионизация поверхности ядер комет
под воздействием солнечного ветра»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.1. – Физика космоса, астрономия

1. Актуальность избранной темы

Диссертационная работа А.А.Ибрагимова посвящена изучению последствий взаимодействия солнечного ветра с плазменными хвостами и ледяной поверхностью ядер комет. Анализ физических и химических процессов, развивающихся в результате перемещения кометы в плазме солнечного ветра, – важный аспект научного исследования в области астрофизики и космической науки. До начала космической эры у человечества не было возможности измерять параметры плазмы непосредственно в солнечном ветре, *in situ*, и именно изучение поведения хвостов комет дало первые представления о межпланетной среде. Так, к 50-м годам XX в. возникло понимание, что взаимодействие комет с некой субстанцией, распространяющейся радиально от Солнца и названной позже «солнечным ветром», приводит к образованию характерных структур, связанных с кометами, включая хвосты и комы. Кроме того, наблюдения за кометами позволили предположить наличие некой токовой структуры в солнечном ветре, поскольку ее взаимодействие с кометой приводило к отрыву плазменного хвоста кометы. Эта структура оказалась гелиосферным токовым слоем, продолжением солнечного магнитного экватора, динамика которого неизменно привлекает внимание научного сообщества из-за ассоциации этого самого протяженного магнито-плазменного образования в гелиосфере с высокоэнергичными ионами и множественными геоэффективными процессами. В коме кометы нейтральный газ диффундирует радиально наружу и в конечном итоге ионизируется под воздействием солнечного света или солнечного ветра. Под влиянием силы Лоренца, ускоряющей кометные ионы ортогонально направлению потока солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, заряженные частицы кометного происхождения захватываются и начинают вращаться вокруг линий межпланетного магнитного поля, что вызывает замедление солнечного ветра, поскольку энергия солнечного ветра переходит захваченным частицам. Также, по поведению плазменных хвостов комет можно оценить турбулентность солнечного ветра.

Таким образом, наиболее яркими и до сих пор недостаточно изученными эффектами взаимодействия солнечного ветра с кометами являются (а) абберрация плазменного хвоста кометы, (б) явление отрыва плазменного хвоста при взаимодействии с гелиосферным токовым слоем и (в) замедление солнечного ветра.

Диссертант преимущественно сфокусировал свое внимание на выявлении параметров скорости солнечного ветра по эффекту абберрации хвостов комет, что является актуальной задачей в силу необходимости постоянного сбора информации о состоянии межпланетной среды. Несмотря на то, что на данный момент в космическом пространстве находится несколько аппаратов, измеряющих ключевые плазменные параметры, их количество невелико, и они неравномерно распределены по пространству. В свете вышесказанного, кометы оказываются дополнительными зондами со специфическими свойствами, изучение которых важно для оценки текущего состояния гелиосферной плазмы.

В свою очередь, знание параметров солнечного ветра улучшает качество прогноза космической погоды, необходимого не только для предсказания геомагнитной обстановки, но и для оценки радиационной угрозы для чувствительной аппаратуры космических миссий, спутников и космонавтов. Исследование взаимодействия комет с солнечным ветром открывает новые возможности для понимания физических процессов, технически невозпроизводимых в земных лабораторных условиях, и проливает свет на эволюцию комет в контексте развития Солнечной системы. Кометы являются объектами, возникшими на ранней стадии её формирования, и анализ их свойств и динамики помогает реконструировать характер явлений, происходивших ранее в космической среде.

Тема, выбранная автором, является в некотором роде одной из самых первых задач физики космоса, вставших перед научным сообществом еще до запуска космических аппаратов, однако она по-прежнему актуальна для современного общества и науки.

2. Степень обоснованности научных положений

Автор диссертационной работы обращает внимание на две ключевые проблемы в данной области исследований. Во-первых, указывается на недостаточное соответствие параметров скорости солнечного ветра, определяемых по ориентации плазменных хвостов комет, тем же параметрам, непосредственно измеренным космическими аппаратами. Во-вторых, обсуждается эффективность различных механизмов ионизации кометных молекул.

Диссертант поставил целью (а) измерить кометоцентрические координаты точек оси хвоста кометы, (б) дать оценку применимости метода определения скорости солнечного ветра по абберрации плазменного хвоста кометы, (в) провести анализ воздействия солнечного ветра на поверхность ядра кометы, определяя при этом коэффициент ионно-

ионной эмиссии и количество образующихся ионов, и (г) провести сравнительный анализ результатов исследования с данными космических аппаратов.

В работе четко выделен объект исследования, сформулированы подзадачи и логически выстроена схема изучения объекта. Научные положения обоснованы.

3. Оценка содержания диссертации.

Диссертация написана профессиональным языком; ключевые идеи, объекты исследования, методы и результаты описаны в соответствии с классической традицией подачи научного материала. Содержание диссертации отражает основные положения, представленные к защите.

Во *введении* дается понятие объекта исследования, анализируется актуальность выбранной темы диссертации, определяются цели и задачи, а также излагаются методы исследования. Далее обсуждается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приводится перечень основных положений и список публикаций, представленных к защите.

Первая глава посвящена обзору существующих методов и моделей, применяемых для описания взаимодействия солнечного ветра с плазмой кометы. Перечисляются основные проблемы и вопросы, на которых сфокусировано исследование. Особое внимание уделяется обсуждению точности определения кометоцентрических координат, методам и результатам измерений скорости солнечного ветра. В главе дискутируются практические аспекты и недостатки применения упомянутых методов исследований. В частности, указывается, что метод Штумпфа не предоставляет информации о том, как определить центр фотометрического ядра кометы, а также не учитывает влияние прецессии и собственного движения звезд на точность определения кометоцентрических координат. Отмечается, что методы Бирмана и Брандта для оценки скорости солнечного ветра не учитывают поперечные силы и их использование может привести к занижению значений скорости. В рамках обсуждения автор исследования подводит читателя к мысли о необходимости учитывать погрешность методов перспективного проектирования и важности разработки новых подходов к решению проблемы.

Во *второй главе* работы представлены основы метода Штумпфа для определения кометоцентрических координат хвоста кометы. Этот метод позволил определить координаты с точностью $\pm 1.7^\circ$ для кометы C/2014 Q2 (Lovejoy), но был выявлен недостаток, связанный с неопределенностью положения фотометрического ядра из-за его протяженности. Для улучшения точности было предложено упрощенное решение системы уравнений метода Штумпфа, что снизило погрешность определения координат хвоста кометы до $\pm 0.08^\circ$. При измерении координат кометы C/2019 Y4 (ATLAS) было учтено

влияние прецессии и собственных движений звезд, однако их воздействие оказалось незначительным.

В *третьей главе* проводится определение радиальной скорости солнечного ветра на основе анализа отклонения плазменных хвостов трех комет. Используя их изображения, полученные в ходе эпизодических и многосуточных наблюдений, автор показал, что значения скорости, полученные на основе эпизодических наблюдений, часто отличаются от данных, полученных прямыми измерениями космических аппаратов, и могут указывать лишь на общий характер потока солнечного ветра. Показано, что вклад тангенциальной составляющей солнечного ветра может объяснить эффект отрицательной аберрации плазменных хвостов комет. Указывается на необходимость учета тангенциальной составляющей скорости при определении ее радиальной компоненты. Проведен сравнительный анализ скоростей солнечного ветра, полученных по наблюдениям комет и *in situ*, что позволило выявить систематическое занижение радиальных скоростей, восстановленных по данным хвостов комет. В диссертации предполагается, что данное занижение обусловлено гравитацией Солнца, вызывающей дополнительное смещение оси плазменного хвоста кометы. Проведены расчеты предельных значений этого смещения, лежащих в диапазоне от 1.8° до 12.6° .

Изучение процесса ионизации кометных молекул представляет большой научный интерес. В *четвертой главе* работы рассматриваются различные механизмы ионизации. Представлены результаты моделирования последствий бомбардировки ледяной поверхности ядра кометы протонами солнечного ветра. На основе данных, полученных в лабораторных экспериментах, вычислены коэффициенты пропорциональности эмиссии, которые впоследствии используются для адаптации лабораторных результатов к солнечно-кометным явлениям. Оценена максимальная скорость образования положительных ионов. Для проверки результатов проведено сравнение с данными кометы 67P/Churyumov-Gerasimenko, полученными миссией «Rosetta». Указывается на удовлетворительное совпадение теоретических оценок и наблюдательных данных. В *заключении* сформулированы выводы, указаны перспективы дальнейших исследований и приведен список использованной литературы. В Приложении представлен список сокращений, использованных в диссертации.

4. Степень обоснованности выводов. Достоверность и новизна исследования и полученных результатов

Степень обоснованности выводов основывается на ряде факторов, подтверждающих достоверность и новизну исследования и полученных результатов:

- В работе установлено, что соответствие прямоугольных и экваториальных координат на изображении кометы позволяет сократить объем математических операций при перспективном проектировании по методу Штумпфа.

- Для определения скорости солнечного ветра с учетом дополнительного смещения оси плазменного хвоста кометы в работе разработан метод, базирующийся на количественной оценке влияния тангенциальной компоненты солнечного ветра и солнечной гравитации, что позволяет корректировать значения скорости солнечного ветра, полученные по наблюдениям комет.

- Результаты исследования показывают, что взаимодействие солнечного ветра с поверхностью ядра кометы возможно при разреженной атмосфере и отсутствии у кометы ионосферы на большом удалении от Солнца.

- Определены коэффициенты ионно-ионной эмиссии при бомбардировке льда протонами солнечного ветра.

- В работе показано, что бомбардировка протонами солнечного ветра играет существенную роль как механизм ионизации на начальных этапах ионообразования в кометах. Это заключение базируется на моделировании и сравнении с данными миссии «Rosetta» к комете 67P/Churyumov-Gerasimenko.

- Достоверность исследования и выводов основана на фактических наблюдениях, использовании открытых международных баз данных, допускающих проверку результатов исследования, а также на сопоставлении результатов с данными измерений, проведенных космическими аппаратами. Проведено сравнение модели взаимодействия солнечного ветра с ледяной поверхностью кометы с данными миссии «Rosetta» к комете 67P/Churyumov-Gerasimenko. Результаты диссертации были опубликованы в рецензируемых журналах и апробированы на научных семинарах и международных конференциях, что подтверждает их достоверность и новизну.

5. Достоинства и недостатки

Диссертационная работа в целом производит позитивное впечатление как за счет темы, довольно редкой не только на постсоветском пространстве, но и в мире, так и за счет последовательного и внятного изложения целей работы и методов решения поставленной задачи. Видно, что автор обладает достаточной квалификацией специалиста, способного грамотно анализировать данные, а также умеет излагать идеи и описывать результаты исследования. Преимуществом работы является то, что автор не приукрашивает возможности использованных методов, ясно видит проблемы в определении скорости солнечного ветра по кометным данным и ищет пути их решения.

В качестве недостатков работы следует отметить неудовлетворительный обзор литературы по данной тематике, небрежность в оформлении диссертации и ошибки в лексике и пунктуации. Из диссертации не очевидно, что автор понимает место своей работы в текущей картине исследований в данном направлении. В последние 20 лет кометная астрономия развивается семимильными шагами не только в силу улучшения технических характеристик приборов и способности человечества сажать зонды на кометы, но и из-за возможности компьютерной обработки данных и изображений. Появились новые результаты и новые модели, позволяющие восстанавливать параметры скорости солнечного ветра по наблюдениям комет. Между тем, из 132 статей, процитированных в диссертационной работе, только 12 были опубликованы в последние 6 лет. Автор много ссылается не просто на старые, а на очень старые работы, написанные до 1980-х гг., хотя и ставшие классическими, но не отражающие актуальные знания о предмете исследований.

Существенным недостатком является то, что автор использует ссылки на такие работы для обоснования постановки задачи. Например (стр. 9): *«Другая проблема связана с причинами появления в атмосферах комет наряду с нейтральными молекулами также и ионизованных. В настоящее время существуют различные мнения на счет доминирующего механизма ионизации кометных молекул... Однако, в [18, 30, 31] показано, что все рассматриваемые механизмы слабы, чтобы обеспечить наблюдаемую степень ионизации. Также, в работах [17, 24-28] бомбардировка (соударения 1-го рода, катодное распыление) как механизм ионизации кометных молекул не рассматривался ввиду того, что бомбардировка действует только в отсутствие ионопаузы у кометы. Вопрос об истинной эффективности бомбардировки как механизма ионизации требует дополнительного исследования.»* Этот абзац звучит убедительно, пока не помотришь на ссылки. В списке литературы обнаруживается, что работа [18] была написана в 1966 г., работа [30] – в 1951 г., статья [31] – в 1964 г., [17] – в 1956 г., [25] – 1964 г. и [28] – в 1953 г. О мнении авторов этих работ никоим образом невозможно говорить как о высказанном в *«настоящее время»*.

Еще один пример. На странице 29 утверждается, что *«По результатам нахождения скорости СВ по плазменным хвостам комет были сделаны следующие выводы [53, 54]:....Величина скорости СВ в пределах 0.5-2.5 а.е. не зависит от гелиоцентрического расстояния.»* Работы [53, 54] были написаны в 1974 г., и ссылок на них явно недостаточно для того, чтобы убедить читателя в справедливости таких утверждений.

Ссылки на дальних предшественников нужны и важны, но они не могут рассматриваться как единственное основание для выдвижения гипотез и современной научной деятельности. Возможно, автор имел в виду и ряд более современных работ, но в диссертации это не отражено.

Еще одно место содержит явные ошибки (стр. 31). «В работе [20] по данным около 1600 наблюдений комет из [21] представлены результаты, касающиеся скорости плазмы СВ и делаются следующие выводы: радиальная компонента СВ имеет довольно резкий минимум скорости в среднем равным 150 ± 50 км/с; скорость СВ имеет эмпирические соотношения с геомагнитной активностью и с индексом поверхностного магнитного возмущения; эти соотношения оценивают среднюю скорость плазмы как 500 ± 50 км/с... Также отмечено, что широтные вариации скорости СВ не могут быть определены в связи с малочисленностью данных [20].» Во-первых, работа [20] относится к самому началу космической эры. Это 1967 год. Довольно странный выбор ключевой работы для введения в предмет исследования. С 1967 года было запущено множество миссий и опубликовано значительное количество обзоров по наблюдениям скорости солнечного ветра *in situ*, включая широтные измерения. Во-вторых, ссылка дана некорректно. Неверные страницы, неверное название, неверные утверждения.

Правильное название и выходные данные статьи: Hundhausen A. J. et al. Vela 3 satellite observations of solar wind ions: A preliminary report // Journal of Geophysical Research. 1967. Vol. 72. issue 1, pp. 87-100. <https://doi.org/10.1029/JZ072i001p00087>.

В этой статье нет ни слова о кометах. Это предварительный отчет о результатах наблюдений солнечного ветра спутниками Vela 3 в короткие периоды их выхода за пределы магнитосферы Земли.

О каком резком минимуме скорости говорит автор? Модуль скорости солнечного ветра вообще не опускается до 150 км/с на орбите Земли. Таких утверждений в Hundhausen et al. 1967 нет.

Два значения, 150 км/с и 500 км/с, указанные автором, отличаются более, чем в 3 раза. Не вполне ясно, почему автор считает их сравнимыми. Времена, когда надо было просто оценить порядок величины скорости солнечного ветра, давно прошли.

В целом, вводная часть диссертации страдает из-за архаичности ссылок и из-за отсутствия должного описания преемственности идей и исторического развития данной области знаний, а в дискуссии нет сравнения результатов диссертационного исследования с результатами, полученными авторами, ставящими сходные задачи. Возникает впечатление, что диссертационное исследование висит в некотором научном вакууме, что принижает достоинства работы.

Ошибки, связанные с языком и некачественным оформлением ссылок, часты, но в научных статьях это корректируется редакторской правкой на этапе выпуска статьи, поэтому они не могут считаться значительными.

Технические ошибки:

- (стр. 36) «Если переданная при столкновении энергия превышает теплоту испарения атома, а его импульс направлен в сторону вакуума, то такой атом покидает поверхность (рис. 1.2).» Однако на Рис. 1.2. показана гелиоцентрическая сфера, проведенная через положение кометы. Очевидно, здесь предполагался еще один рисунок.

- формулы на странице 36 не пронумерованы. Нумерация формул отсутствует во многих местах, из-за этого не вполне удобно читать текст.

При этом указанные выше недочеты ни в коей мере не умаляют качества выполненной соискателем работы и важности её результатов и выводов, а лишь указывают на необходимость улучшения подачи материала, особенно с точки зрения обоснования основных предположений и грамотного обсуждения результатов.

6. Значимость результатов для науки и их практическая применимость

Результаты, полученные в диссертационном исследовании, могут применяться для косвенной оценки скорости солнечного ветра на различных расстояниях от Солнца. Из выводов диссертанта следует, что, несмотря на недостатки обсуждаемых выше методов, чувствительность плазменных хвостов комет к текущему состоянию солнечного ветра – важный фактор, который можно использовать не столько для измерений абсолютной величины скорости, сколько для отслеживания резкого изменения режима течения солнечного ветра. Такие исследования могут быть особенно ценны в ситуациях, когда вокруг кометы нет ни одного космического аппарата, способного измерить скорость *in situ*. В связи с этим, результаты исследования имеют значительный потенциал, который способен реализоваться при комплексном использовании методов, обсужденных в диссертации, в сочетании с другими методами дистанционного зондирования солнечного ветра в областях космического пространства, где отсутствуют прямые измерения плазменных параметров.

7. Вопросы

- (стр. 17) "*..существование в результатах резкого отклонения отдельной скорости СВ от величины среднего значения.*" – фраза звучит научнообразно, но не несет смысла. Что имел в виду автор?

- Хотелось бы услышать мнение автора о потенциальной возможности сочетания метода оценки скорости солнечного ветра по абберации хвостов комет и метода дистанционного зондирования солнечного ветра по межпланетным сцинтилляциям (interplanetary scintillations, см. https://ips.ucsd.edu/IPS-ENLIL_predictions), а также метода анализа распространения плазмы по измерениям в белом свете с помощью так называемых heliospheric imagers (Solar Orbiter Heliospheric Imager, STEREO heliospheric imager, и т.д.).

- Какие еще предполагаемые факторы, по мнению автора, могут оказывать наибольшее влияние на наблюдаемые аберрации хвостов комет (например, воздействие межпланетного магнитного поля, турбулентность, области взаимодействия разноскоростных потоков – <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/ad08af>)?

8. Рекомендации и выводы

1. В будущих работах необходимо анализировать как исторические, так и недавние работы по теме исследования, сопоставляя с ними полученные результаты.

2. Желательно оформлять работу аккуратно, проверять соответствие номеров ссылок и рисунков написанному в тексте.

3. В диссертации не видно понимания того факта, что все дистанционные методы изучения солнечного ветра дают очень большие погрешности по сравнению с измерениями *in situ*, и при подаче материала их надо смыслово отделять от измерений космических аппаратов. В тексте всё смешано – и измерения космических аппаратов, и дистанционные (косвенные) методы анализа скорости солнечного ветра. Иногда результаты перечисляются в одном абзаце так, как будто речь идет о методах одного типа, результаты которых сравнимы. Необходимо избегать этого в будущем.

4. Когда автор размышляет о скорости солнечного ветра как в свете дистанционных измерений параметров хвостов комет, так и в ракурсе непосредственных измерений в солнечном ветре, необходимо четко указывать, о каких гелиоцентрических расстояниях идет речь. Несмотря на утверждение автора, что скорость не меняется от 0.5 до 2.5 а.е., это не вполне так. Она не меняется по порядку, если именно это имеет в виду автор, но такой точности измерений уже давно недостаточно. Осредненные по расстоянию и времени значения скорости варьируются с удалением от Солнца меньше, чем, положим, плотности, но скорость солнечного ветра резко растет с расстоянием от Солнца, а потом медленно выходит на плато к 5-6 а.е., и это нужно учитывать. Сравнение скоростей солнечного ветра в стиле «В работе X получена такая-то скорость, а в работе Y другая» некорректно. Всегда нужно указывать, на каких расстояниях велись измерения, каким методом, и в каком потоке. Солнечный ветер – это не гомогенная масса, текущая с переменной скоростью. Он очень разнообразен и состоит из потоков и струй различного происхождения, распространяющихся с разной скоростью. Поэтому в исследованиях скорости солнечного ветра в одной точке необходимо указывать, о каком именно типе потоков идет речь. Из-за эффекта «струй» скорость, измеренная в течение дня на одном и том же расстоянии от Солнца, может отличаться в несколько раз. Именно поэтому самым оптимальным приложением данного исследования является анализ динамики солнечного ветра, а не абсолютных значений его скорости.

В целом, диссертационное исследование проведено на уровне, позволяющем подтвердить научную квалификацию соискателя. Диссертация Ибрагимова Алишера Абдуллоходжаевича соответствует специальности 1.3.1. – «Физика космоса, астрономия» и отрасли наук, по которой она представлена к защите. Результаты работы представляют интерес для специалистов в области физики космоса, астрофизики и физики гелиосферы и могут быть использованы в профильных институтах и учебных заведениях РАН и НАН Таджикистана. Несмотря на указанные выше недостатки, диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,

Ольга Валерьевна Хабарова,

ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии Наук (ИЗМИРАН),

к.ф.-м.н. по специальности 01.03.03 - Физика Солнца.

Адрес: 108840, Россия, Москва, Троицк, Калужское шоссе, д. 4 ,
ИЗМИРАН; email: habarova@izmiran.ru, тел.: +7 (495) 851-01-20; факс:
+7 (495) 851-01-24

/О.В. Хабарова/

25 марта 2024

Подпись О.В. Хабаровой заверяю.

Ученый секретарь ИЗМИРАН, к.ф.-м.н.

