

**УТВЕРЖДАЮ**

Заместитель директора ИПФ РАН  
по научной работе

Д.Ф.-м.н., профессор РАН



 В. А. Скалыга

«16» мая 2022 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

Федерального исследовательского центра Института прикладной физики  
Российской академии наук (ИПФ РАН) на диссертационную работу

**Шувалова Сергея Дмитриевича**

на соискание учёной степени «кандидат физико-математических наук» по специальности  
«01.03.03 - физика Солнца»

(отрасль наук: «физико-математические») на тему

**«Исследование аномалий горячего потока у Земли и Марса  
и происхождения дневной магнитосферы Марса»**

Диссертационная работа С.Д. Шувалова посвящена изучению аномалий горячего потока (АГП) – крупномасштабных плазменных явлений, формирующихся перед головными ударными волнами планет – у Земли и Марса, а также анализу плазменных популяций в области между обтекающим потоком и ионосферой на дневной стороне Марса. Актуальность темы определяется важной ролью переходных областей между околопланетным пространством и солнечным ветром во взаимодействии последнего с околопланетной плазмой и, в частности, в трансформации энергетических спектров заряженных частиц. В работе получены новые научные результаты, кратко охарактеризованные ниже при изложении содержания диссертации.

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и трёх приложений. Список цитируемой литературы содержит 89 наименования.

**Введение** диссертационной работы содержит обоснование актуальности, новизны, значимости представленной работы, в нём сформулированы основные методы исследования. Представлены результаты работы и положения, выносимые на защиту. Охарактеризован личный вклад соискателя в исследования, вошедшие в диссертацию.

**Глава 1** содержит литературный обзор наиболее крупных форшок-транзиентов, наблюдаемых у планетных головных ударных волн, и описание известных механизмов их формирования. Приведено описание пузырей в форшоке, формируемых в условиях доминирующей компоненты межпланетного магнитного поля, направленной вдоль линии «планета-Солнце», и наличия в нем вращательного разрыва; аномалий горячего потока, возникающих в результате транзита тангенциального разрыва в магнитном поле солнечного ветра по фронту головной ударной волны; полостей в форшоке, образующихся при определенных условиях в межпланетном магнитном поле в отсутствие в нем разрыва.

В **Главе 2** приводится многоточечный анализ околоземной АГП, зарегистрированной спутниковой группировкой Cluster 22 февраля 2006 г. Выполнен расчет ориентации межпланетного токового слоя, связанного с событием. Проведен анализ функции распределения ионов вблизи и внутри АГП, показавший наличие двух популяций частиц: протонов солнечного ветра, а также встречного ему пучка. Для каждой популяции выполнен расчет моментов функции распределения.

Анализ структуры пучка ионов, встречного солнечному ветру, показал, что, по мере приближения токового слоя к космическому аппарату, угловой размер пучка увеличивается, а гирорадиусы самых быстрых наблюдаемых ионов убывают. На основании этих данных сделан вывод о том, что пучок, примыкающий к токовому слою, состоит из замагниченных ионов токового слоя.

Также было проведено сравнение спектров частиц из магнитослоя с питч-углами, меньшими, чем  $90^\circ$ , со спектрами частиц из токового слоя, и с проинтегрированным по времени спектром частиц пучка, примыкающим к токовому слою. На основании схожести этих спектров сделан вывод о поступлении частиц АГП из магнитослоя.

В **Главе 3** представлены результаты статистического анализа 19 АГП, зарегистрированных космическим аппаратом MAVEN вблизи Марса в период с декабря 2014 г. по февраль 2016 г. Для каждого события рассчитана скорость движения образования по фронту головной ударной волны и оценен размер образования. Предложен алгоритм оценки возраста событий в предположении, что они формируются вблизи подсолнечной точки. Показано, что АГП являются распространенным типом форшок-транзиентов у Марса и частота их возникновения составляет примерно 0,6 событий в день.

**Глава 4** посвящена анализу области (магнитосферы) на дневной стороне Марса, расположенной между ионосферой и обтекающим потоком солнечного ветра. Анализ функции распределения ионов атомарного и молекулярного кислорода, измеренной аппаратом MAVEN, показал наличие в этой области двух популяций частиц,



соответствующих разогретым ионосферным частицам и захваченным солнечным ветром ионам из кислородной короны Марса и из обтекающего потока. Для каждой из популяций частиц были рассчитаны моменты функции распределения, что позволило вычислить их парциальные давления. Показано, что в области дневной магнитосферы тепловое давление частиц ионосферы уравновешено суммой теплового и динамического давлений ионов, захваченных солнечным ветром.

**В Заключение** сформулированы основные результаты работы.

Все основные результаты диссертации являются оригинальными и получены впервые.

Положения, выносимые на защиту, достоверны и обоснованы. По теме диссертации опубликованы 3 статьи в зарубежных изданиях, индексируемых в международных системах цитирования, а также сделано 8 докладов на российских и международных конференциях. Автореферат диссертации отражает её содержание.

#### **Замечания к содержанию диссертации:**

1. В качестве недостатка представленного анализа наблюдений, характеризующихся значительной неопределенностью пространственно-временной динамики, следует отметить, что во всех основных случаях принятые интерпретации - безальтернативные. Например, почему на стр. 53 при обсуждении единичного события автор исходит из предположения о тангенциальном разрыве, хотя в магнитной гидродинамике возможны несколько типов разрывов, а отсутствие движения среды через границу разрыва не проверялось?
2. Точность формулы (3.1), вероятно, сильно зависит от угла между рассматриваемыми магнитными полями. Этот вопрос следовало обсудить.
3. Затрудняет оценку работы отсутствие количественного критерия степени "молодости" аномалии горячего потока.
4. На стр. 59 величина  $N = 743$  часа размерная. Как тогда понимать формулу (3.7) с  $N-1$ ?
5. Для дневной магнитосферы Марса была бы полезна оценка времени взаимодействия двух популяций ионов и его достаточности для выравнивания давлений при различных направлениях межпланетного магнитного поля.
6. При вычислении нормали к токовому слою в приближении тангенциального разрыва, описанном в Главе 2 диссертации, было бы целесообразно также привести результаты анализа параметров наблюдаемого разрыва методом наименьших вариаций.

7. В Главе 3 диссертации следовало бы уточнить значение термина «нестационарность» в применении к аномалиям горячего потока у Марса и то, как она определяется количественными характеристиками событий.
8. В приведённом в Главе 4 описании процесса захвата ионов планетного происхождения солнечным ветром в окрестности Марса без должного обоснования упущено рассмотрение электрического поля, возникающего при разделении зарядов.

Сделанные замечания не снижают ценности диссертационной работы и не влияют на её положительную оценку, а указывают на возможные направления дальнейших исследований с большими объемами данных. Рассматриваемая диссертационная работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям согласно «Положению о присуждении ученых степеней», утвержденному Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., а её автор С.Д. Шувалов заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – «физика Солнца».

Результаты работы С.Д. Шувалова могут быть использованы в НИИЯФ МГУ, ИПФ РАН, НИРФИ, ПГИ, ИЗМИРАН, ОИФЗ РАН, СПбГУ, МФТИ, ФИАН, ГАИШ, ИНАСАН, ИСЗФ СО РАН и других российских и зарубежных научных организациях, ведущих работы по физике космической плазмы.

Диссертация С.Д. Шувалова обсуждалась на семинаре отдела № 130 ИПФ РАН 12.04.2022 г.

Отзыв составлен заведующим отделом астрофизики и физики космической плазмы д.ф.-м.н., член-корр. РАН В.В. Кочаровским и главным научным сотрудником отдела астрофизики и физики космической плазмы д.ф.-м.н., проф. П.А. Беспаловым.

д.ф.-м.н., член-корр. РАН

В.В.Кочаровский

Телефон 8-831-416-48-94, e-mail: [kochar@ipfran.ru](mailto:kochar@ipfran.ru)

д.ф.-м.н., профессор

П.А. Беспалов

Телефон 8-831-416-47-32, e-mail: [peter@ipfran.ru](mailto:peter@ipfran.ru)

603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, ИПФ РАН