

На правах рукописи



Шувалов Сергей Дмитриевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ АНОМАЛИЙ ГОРЯЧЕГО ПОТОКА У ЗЕМЛИ И  
МАРСА И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ДНЕВНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ  
МАРСА**

01.03.03 физика Солнца

Автореферат

Диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2022

Работа выполнена в Институте космических исследований Российской академии наук

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук, профессор, Вайсберг Олег Леонидович,  
Институт космических исследований Российской академии наук

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, Калегаев Владимир Владимирович,  
(НИИЯФ МГУ)

доктор физико-математических наук, Чашей Игорь Владимирович,  
(ПРАО АКЦ ФИАН)

**Ведущая организация:**

Институт прикладной физики Российской академии наук

Защита диссертации состоится « 8 » июня 2022 г. в 13 ч. 00 мин. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 002.113.03 при ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук по адресу: 117997, г. Москва, Профсоюзная ул., д. 84/32, 3-й подъезд, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН  
и на сайте <http://www.iki.rssi.ru/diss/2022/shuvalov.htm>

Автореферат разослан «    » апреля 2022 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.113.03  
кандидат физико-математических наук



О. Ю. Цупко

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследования

Перед фронтом головной ударной волны Земли присутствует сильно возмущенная область, в которой угол  $\theta_{\text{Вп}}$  между нормалью к ударной волне и направлением межпланетного магнитного поля составляет менее  $45^\circ$ , называемая форшоком, в которой наблюдается ряд нестационарных явлений, носящих собирательное название «форшок-транзиенты». Одними из наиболее примечательных образований такого типа являются аномалии горячего потока (АГП), наблюдаемые в месте пересечения головной ударной волны и разрыва в межпланетном магнитном поле. Важность изучения данных образований обусловлена их значительным размером (от одного до нескольких радиусов Земли), который позволяет на короткое время почти полностью локально отражать солнечный ветер и вызывать сильные возмущения в магнитосфере (см., например, Jacobsen и др., 2009, Turner и др., 2011), а в случае планет без глобального магнитного поля, и в ионосфере. АГП представляют собой поток горячей плазмы, наблюдаемый перед ударной волной, в области её пересечения с межпланетным токовым слоем (ТС, Smith, 2001) или другим разрывом в солнечном ветре (см. обзор Tsurutani и др., 1995 и приведенные в нем ссылки). Направление скорости данного образования, как правило, отлично от направления скорости солнечного ветра и может быть направлено как в сторону ударной волны, так и от неё. АГП характеризуются высокой температурой и низкой концентрацией плазмы в центральной части, которая окружена областями сжатия с высокими плотностью и температурой. Актуальность исследования АГП у Земли обусловлена действующей орбитальной группировкой из 4 спутников Cluster, проводящей многоточечные измерения в плазме. Данные, получаемые с этих аппаратов, могут быть использованы для изучения характеристик АГП одновременно в разных точках, что позволяет изучать структуру данных явлений и разделять пространственные вариации плазмы от временных. Глава 2 посвящена изучению одного события АГП у Земли по данным этой спутниковой группировки.

В конце 2014 г. на орбиту Марса был выведен спутник NASA Mars Atmosphere and Volatile Evolution mission (MAVEN), на борту которого установлена аппаратура, впервые позволяющая вести измерения плазмы на орбите Марса с высоким временным разрешением в связке с измерениями магнитного поля. Эти данные впервые позволили однозначно отождествить событие АГП у Марса (Collinson и др., 2015), однако статистического исследования этих явлений у данной планеты не проводилось. В главе 3

представлены результаты анализа 19 таких событий, содержащего расчёт ряда их характеристик и частоты возникновения этих явлений у Марса.

Ещё одной темой, освещенной в данной диссертации, является исследование дневной магнитосферы Марса, представляющей собой область между верхней частью ионосферы и обтекающим потоком солнечного ветра, в которой формируются ионы, в последующем дрейфующие в хвост магнитосферы Марса. Магнитосфера Марса была обнаружена в 1970х годах на спутниках Марса Марс-2,-3 и -5 (Vaisberg и др., 1976), и её изучение было продолжено на спутнике Фобос-2 (Szego и др., 1998). В настоящее время продолжают исследования на спутнике Европейского космического агентства (ЕКА) Mars Express, и MAVEN, однако основное внимание уделяется исследованиям ночной магнитосферы и атмосферных потерь.

В работе (Zelenyi и Vaisberg, 1985) было показано, что при взаимодействии солнечного ветра с атмосферой планеты без собственного глобального магнитного поля (Венеры, которая в данном контексте близка к Марсу) дневная магнитосфера играет важную роль в образовании больших атмосферных потерь. Что касается дневной магнитосферы Марса, то небольшая толщина дневной магнитосферы (100-200 км), быстрое прохождение магнитосферы спутником и недостаточное быстродействие плазменных приборов до недавнего времени препятствовали её исследованию. Выведенный на орбиту спутник Марса MAVEN оснащён комплексом приборов для измерений плазмы с достаточным временным разрешением, позволяющий решить данную задачу, что обуславливает актуальность изучения дневной магнитосферы Марса в настоящее время. В главе 4 проведено исследование образования, характеристик и процессов, протекающих в дневной магнитосфере Марса.

## **Цели работы**

Целями данной диссертации являются:

1. Выяснение механизма происхождения молодой АГП, зафиксированной спутниковой группировкой Cluster 22 февраля 2006 года, объяснение структуры пучка ионов в области, прилегающей к токовому слою.
2. Проведение статистического анализа АГП у Марса, выявление особенностей их формирования. Оценка размера и частоты возникновения АГП у Марса.
3. Изучение ионного состава дневной магнитосферы Марса, расчет давлений плазменных популяций в этой области.

## **Научная новизна**

В главе 2 предложен новый механизм возникновения молодой АГП на примере одного события, зарегистрированного у фронта головной ударной волны магнитосферы Земли; приведено объяснение структуры наблюдаемого пучка, исходящего от ударной волны.

В главе 3 приведен впервые произведенный статистический анализ АГП у Марса. Показано, что данный тип форшок-транзиентов является распространенным у Марса, и частота появлений таких явлений на этой планете составляет  $\sim 0,6$  событий в день. Также показано, что  $X$  – компонента скорости (вдоль оси Марс-Солнце) АГП отрицательна почти для всех зарегистрированных событий, что позволяет оценивать время жизни отдельной аномалии в предположении её формирования вблизи подсолнечной точки.

В главе 4 впервые исследована область на дневной стороне Марса между обтекающим потоком солнечного ветра и ионосферой, приведён анализ популяций населяющих её частиц и выявлено равенство давлений между ними.

## **Теоретическая и практическая ценность работы**

Установлен механизм формирования конкретной АГП у Земли. Это дает основу для построения новых моделей возникновения АГП и изучения их характеристик.

Полученные результаты о частом возникновении АГП вблизи Марса подтверждают универсальность данного явления и то, что АГП могут возникать на любых типах межпланетных и, возможно, даже межзвездных ударных волнах.

Показано постоянное существование дневной магнитосферы Марса. Она представляет собой область между ионосферой и обтекающим потоком солнечного ветра, в которой наблюдаются две популяции ионов с равными давлениями. Изучение процессов, протекающих на дневной стороне, позволит лучше понять природу потери Марсом атмосферы.

## **Методология и методы исследования**

Для исследования АГП у Земли (глава 2) были использованы данные магнитометров и ионных спектрометров космической группировки Cluster, состоящей из четырёх идентичных спутников. Данные об изменении направления вектора магнитного поля, положении спутников и времени регистрации события на каждом из них позволили вычислить ориентацию связанного с событием ТС. Регистрация события четырьмя космическими аппаратами позволила также вычислить ориентацию ТС методом многоспутникового анализа и сравнить её с полученной путем анализа магнитного поля.

Одновременное использование данных магнитометра и измерений функции распределения частиц ионными спектрометрами позволили вычислить распределения частиц по питч-углам. Также информация о напряженности магнитного поля и энергиях регистрируемых частиц на различных расстояниях от ТС позволили сделать вывод о структуре пучка в области, прилегающей к ТС, и в самом ТС.

Для проведения статистического анализа АГП у Марса (глава 3) по данным магнитометра, двух спектрометров ионов и спектрометра электронов за несколько месяцев были вручную отобраны 19 событий АГП. Для каждого события рассчитана нормаль к связанному с ним ТС и нормаль к ударной волне в месте её соединения с ТС. На основании этих данных, а также скорости солнечного ветра, был рассчитан вектор скорости распространения АГП согласно методике, представленной в работе (Schwartz et al, 2000).

Был предложен метод оценки возраста АГП как времени, за которое ТС преодолевает расстояние от подсолнечной точки на ударной волне до места регистрации события. Данная методика основана на том, что время, в течение которого линия пересечения ТС и ударной волны движется в направлении Солнца существенно меньше времени, в течение которого она движется от Солнца, что позволяет в некотором приближении считать момент пересечения ТС и подсолнечной точки на ударной волне началом временного отрезка, в течение которого может происходить формирование АГП.

Также был рассчитан размер каждой АГП в направлении её распространения и вдоль ТС. Сравнение этих двух величин показало, что АГП, как правило, вытянуты вдоль ТС.

Для исследования дневной магнитосферы Марса (глава 4) был использован метод анализа функции распределения ионов в пространстве скоростей. Для этого было выбрано 115 пересечений спутником MAVEN дневной магнитосферы и проведено исследование функций распределения основных ионов магнитосферы:  $O^+$  и  $O_2^+$ . Для того, чтобы исключить из рассмотрения влияние магнитных аномалий Марса на исследуемую область, рассматривались только пересечения дневной магнитосферы в северном полушарии, так как области локальной намагниченности в этом полушарии практически отсутствуют.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Ионы в аномалии горячего потока, зарегистрированной спутниковой группировкой Cluster 22 февраля 2006 года перед головной ударной волной магнитосферы Земли, происходят из магнитослоя и проникают в аномалию горячего потока через область пересечения межпланетного токового слоя и ударной волны.

2. Пучок ионов, наблюдаемый в области, прилегающей к токовому слою со стороны, соответствующей направлению его движения, сформирован из ионов токового слоя, имеющих гирорадиусы, превышающие толщину токового слоя.
3. Аномалии горячего потока являются распространенным типом форшок-транзиентов у Марса. Частота их возникновения составляет 0,6 событий в день. Отсутствие связи между временами жизни аномалий горячего потока, зарегистрированными у Марса, и их размерами означает, что эти образования являются нестационарными.
4. Дневная магнитосфера Марса, определяемая как область между ионосферой и обтекающим потоком, состоит из разогретых ионов верхней ионосферы и вторгающихся в неё захваченных солнечным ветром ионов кислородной короны Марса. Давления разогретых ионосферных частиц и захваченных ионов солнечного ветра равны в области дневной магнитосферы.

### **Личный вклад автора**

Все работы, описанные в данной диссертации, проведены либо лично автором, либо при его непосредственном участии.

В главе 2, относящейся к анализу АГП у Земли по данным спутниковой группировки Cluster, автором были рассчитаны энергетические спектры ионов в следующих областях: (1) внутри АГП, (2) в области, прилегающей к ТС, (3) магнитослое для частиц, питч-угол которых превышает  $90^\circ$ . Автором было проведено сравнение спектров, показавшее их схожесть. На основании этого сравнения был сделан вывод о том, что ионы АГП происходят из магнитослоя. Также автором была рассчитана ориентация и скорость движения ТС, зависимость максимальной скорости частиц в области, прилегающей к ТС, от времени. Сравнение этих данных выявило линейную зависимость между максимальной скоростью частиц в области, прилегающей к ТС, и расстоянием до ТС, на основании чего был сделан вывод структуре пучка в области, прилегающей к ТС. Помимо этого, автором были посчитаны моменты функции распределения для двух отдельных популяций частиц, соответствующих популяции ионов солнечного ветра и популяции ионов, исходящей со стороны ударной волны.

В главе 3, где приводится статистический анализ АГП у Марса, автором выполнена обработка и анализ данных, были предложены методы оценки размеров и времени жизни анализируемых событий, вычислены их параметры, в том числе время жизни и размеры, а также проведен сравнительный анализ этих параметров. Автором написан ряд программ для визуализации полученных результатов и функций распределения ионов, измеренных

комплексом приборов аппарата MAVEN, проведена оценка частоты возникновения АГП у данной планеты.

В главе 4, содержащей описание области между обтекающим потоком и дневной ионосферой Марса, автором проведен анализ ионного состава. В результате этого анализа было выделено две популяции частиц, для каждой из которых автором были рассчитаны моменты функции распределения и проведено сравнение их давлений вдоль траектории движения космического аппарата из обтекающего потока в ионосферу. Данное сравнение выявило равенство давлений этих популяций в области дневной магнитосферы Марса.

### **Апробация работы**

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих международных и российских конференциях:

1. 2016 г. Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», секция «Солнечный ветер и гелиосфера», Обнаружение источника пучка ионов, приводящего к развитию активного токового слоя, С.Д. Шувалов, О.Л. Вайсберг, А.Ю. Шестаков, Ю.М. Голубева. Устный доклад
2. 2016 г. Москва, XIII конференция молодых ученых "фундаментальные и прикладные космические исследования", секция «Физика Солнечной Системы», Обнаружение источника пучка ионов, приводящего к развитию активного токового слоя, Шувалов С.Д., Вайсберг О.Л., Шестаков А.Ю., Голубева Ю.М., устный доклад
3. 2017 г. Двенадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», секция «Солнечный ветер и гелиосфера», Обнаружение источника пучка ионов, приводящего к развитию активного токового слоя, О.Л. Вайсберг, С.Д. Шувалов, А.Ю. Шестаков. Устный доклад
4. 2018 г. Москва, Тринадцатая ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе", сессия «Теория и наблюдение токовых слоёв», Статистический анализ аномалий горячего потока у Марса, Шувалов С.Д., Вайсберг О.Л., Ермаков В.Н., Ким К.И., устный доклад
5. 2018 г. Москва, XV конференция молодых ученых "фундаментальные и прикладные космические исследования", секция «Физика Солнечной Системы», Статистический анализ аномалий горячего потока у Марса, Шувалов С.Д., Вайсберг О.Л., Ермаков В.Н., Ким К.И., устный доклад

6. 2018 г. Москва, 9th Moscow Solar System Symposium, session “Solar wind interactions with planets and small bodies”, Dynamics of Hot Flow Anomalies at Mars, Sergey Shuvalov et al. Устный доклад
7. 2019 г. Москва, XVI конференция молодых ученых "фундаментальные и прикладные космические исследования", секция «Физика Солнечной Системы», Характеристики распространения аномалий горячего потока у Марса, Шувалов С.Д. и др., устный доклад
8. 2021 г. Москва, Шестнадцатая ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе", сессия «Солнечный ветер и гелиосфера», Свойства и источники дневной магнитосферы Марса, Шувалов С.Д., Вайсберг О.Л.. Устный доклад

### **Публикации автора по теме диссертации**

Результаты диссертационной работы опубликованы в 3 статьях в реферируемых международных журналах, рекомендованных ВАК:

1. O.L. Vaisberg, S.D. Shuvalov, A.Yu. Shestakov, Y.M. Golubeva, Origin of the backstreaming ions in a young Hot Flow Anomaly, Planetary and Space Science, Volume 131, 15 October 2016, Pages 102-110, ISSN 0032-0633, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2016.08.003>
2. Shuvalov, S. D., Ermakov, V. N., Zorina, V. O., Kim, K. I. (2019). Propagation properties of Hot Flow Anomalies at Mars: MAVEN observations. Planetary and Space Science, 179, 104717. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104717>
3. O. Vaisberg, S. Shuvalov, Properties and sources of the dayside Martian magnetosphere, Icarus Volume 354, 15 January 2021, 114085, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.114085>

### **Прочие публикации автора**

1. О. Л. Вайсберг, П. П. Моисеев, Г. В. Койнаш, Л. А. Аванов, В. Н. Смирнов, В. В. Летуновский, А. К. Тоньшев, В. Д. Мягких, А. В. Лейбов, С. Д. Шувалов, Панорамный энерго-масс-спектрометр ионов: опыт работы в проекте Фобос-Грунт, Космические исследования, 2014, том 52, № 6, с. 521–525, DOI: 10.7868/S0023420614060077
2. Vaisberg, O., et al. (2016), The  $2\pi$  charged particles analyzer: All-sky camera concept and development for space missions, J. Geophys. Res. Space Physics, 121, 11,750–11,765, doi:10.1002/2016JA022568.
3. В. Н. Ермаков, Л. М. Зеленый, О. Л. Вайсберг, Е. А. Семенцов, Э. М. Дубинин, J. E. P. Connerney, С. Д. Шувалов, Первичный анализ потоков ионов в хвосте Марса по

- данным одновременных измерений на спутниках MarsExpress и MAVEN, *Астрономический вестник*, 2017, том 51, №5, с. 367-375, DOI: 10.7868/S0320930X17050024
4. Е. Е. Григоренко, С. Д. Шувалов, Х. В. Малова, В. Ю. Попов, В. Н. Ермаков, Э. Дубинин, Л.М. Зеленый, Структура токовых слоев в области ближнего хвоста магнитосферы Марса по наблюдениям спутника MAVEN, *Астрономический вестник*, 2017, том 51, №5, с. 376-391, DOI: 10.7868/S0320930X17050036
  5. O.L.Vaisberg, V.N.Ermakov, S.D.Shuvalov, L.M.Zelenyi, A.S.Znobishchev, E.M.Dubinin, Analysis of dayside magnetosphere of Mars: High mass loading case as observed on MAVEN spacecraft, *Planetary and Space Science Volume 147*, 1 November 2017, Pages 28-37, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.09.005>
  6. E. Grigorenko, S. Shuvalov, H. Malova, E. Dubinin, V. Popov, L. Zelenyi, J. Espley, J. P. Mcfadden, Imprints of quasi-adiabatic ion dynamics on the current sheet structures observed in the Martian magnetotail by MAVEN, *Journal of Geophysical Resesarch*, 2017, 122, 10,176–10,193. <https://doi.org/10.1002/2017JA024216>
  7. Vaisberg, O. L., Ermakov, V. N., Shuvalov, S. D., Zelenyi, L. M., Halekas, J., DiBraccio, G. A., et al. (2018). The structure of Martian magnetosphere at the dayside terminator region as observed on MAVEN spacecraft. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123.<https://doi.org/10.1002/2018JA025202>
  8. Вайсберг О. Л., Шестаков А. Ю., Шувалов С. Д., Журавлев Р. Н., Моисеенко Д. А. Комплекс малогабаритных приборов для исследования космической погоды. *Изв. Вузов. Приборостроение*. 2018. Vol. 61, N 5. P. 398—402. DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-5-398-402
  9. Grigorenko, E. E., Zelenyi, L. M., DiBraccio, G., Ermakov, V. N., Shuvalov, S. D., Malova, H. V., et al. (2019). Thin current sheets of sub-ion scales observed by MAVEN in the Martian magnetotail. *Geophysical Research Letters*, 46. <https://doi.org/10.1029/2019GL082709>
  10. А. Ю. Шестаков, Д. А. Моисеенко, С. Д. Шувалов, О. Л. Вайсберг, Р. Н. Журавлев, Прототип миниатюрного анализатора солнечного ветра для малых космических аппаратов, *Приборы и техника эксперимента*, 2019, № 6, с. 104–108, DOI: 10.1134/S0032816219060144
  11. Д. А. Моисеенко, О. Л. Вайсберг, А. Ю. Шестаков, Р. Н. Журавлев, С. Д. Шувалов, М. В. Митюрин, П. П. Моисеев, И. И. Нечушкин, Е. И. Родькин, А. Д. Васильев, В. В. Летуновский. Аппаратно-программный комплекс для настроек и калибровок ионных

- масс-спектрометров для космических миссий. Приборы и техника эксперимента, 2019, № 3, с. 52–62, DOI: 10.1134/S0032816219020265
12. Д. А. Моисеенко, А. Ю. Шестаков, О. Л. Вайсберг, Р. Н. Журавлев, С. Д. Шувалов, М. В. Митюрин, И. И. Нечушкин, П. П. Моисеев, Исследование процессов рассеяния ионов и нейтральных атомов с использованием стенда нейтральных частиц, Приборы и техника эксперимента, 2020, № 2, с. 81–86, DOI: 10.31857/S0032816220020147
13. С. Д. Шувалов, А. Ю. Шестаков, А. В. Носов, М. В. Митюрин, Д. А. Моисеенко, Р. Н. Журавлёв. Электронный компактный спектрометр ЭКОС для спутников CubeSat. Приборы и техника эксперимента. Приборы и техника эксперимента, 2020, № 2, с. 113–117, DOI: 10.31857/S0032816220030040
14. Ким К. И., Шувалов С. Д., Наблюдение неустойчивости плазмы между ионосферой и обтекающим потоком на дневной стороне Марса, Космические исследования, 2021, т. 9, № 6, с. 519-526, DOI: 10.31857/S0023420621060030
15. Dubinin, E., Fraenz, M., Modolo, R., Patzold, M., Tellmann, S., Vaisberg, O., et al. (2021). Induced magnetic fields and plasma motions in the inner part of the Martian magnetosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2021JA029542. <https://doi.org/10.1029/2021JA029542>
16. Моисеенко Д. А., Вайсберг О. Л., Журавлев Р. Н., Шувалов С. Д., Шестаков А. Ю. Широкоугольный ионный энерго-масс анализатор АРИЕС-Л, *Астрономический вестник*. 2021. Т. 55. № 6. С. 1-12
17. E. E. Grigorenko, L. M. Zelenyi, S. D. Shuvalov, H. V. Malova, E. Dubinin, Electron-scale Current Layers in the Martian Magnetotail: Spatial Scaling and Properties of Embedding, *The Astrophysical Journal*, 2022, Volume 926, Number 2, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac4bd8>

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и трёх приложений, общий объем рукописи составляет 100 страниц. Основной текст диссертации включает 35 рисунков и 4 таблицы. Общее количество цитируемой литературы составляет 89 источников. Приложения включают в себя 7 таблиц.

## **Основное содержание работы**

В **главе 1** приводится литературный обзор форшок-транзиентов - событий, образующихся в области форшока перед головными ударными волнами планет при специфических условиях в солнечном ветре. К наиболее крупным событиям такого типа относятся (1) пузыри в форшоке (foreshock bubbles), (2) АГП (hot flow anomalies),

(3) полости в форшоке (foreshock cavities). Все перечисленные события характеризуются наличием «ядра», содержащим плазму с повышенной температурой и пониженной концентрацией относительно солнечного ветра, окруженного областями сжатия, в которых наблюдается повышенная напряженность магнитного поля и концентрация ионов. Несмотря на это сходство, процессы, приводящие к появлению этих образований, в корне различаются.

Пузыри в форшоке формируются при радиальных условиях в межпланетном магнитном поле (т.е. при доминирующей компоненте магнитного поля, направленной вдоль линии «планета-солнце») и наличии в нём вращательного разрыва. Развитие этих образований происходит из-за неустойчивости, вызванной взаимодействием отраженных протонов от ударной волны с набегающим потоком солнечного ветра через ОНЧ-волны, а также из-за того, что, при определенной геометрии вращательного разрыва, приток отраженных протонов в область ядра превосходит их отток.

АГП возникают при прохождении тангенциального разрыва по фронту ударной волны в случае, когда этот разрыв движется по фронту ударной волны достаточно медленно для того, чтобы структура успела развиваться. Согласно одному из современных представлений, АГП формируются, когда надтепловые частицы в форшоке направляются вдоль разрыва в межпланетном магнитном поле электрическим полем солнечного ветра с одной или двух сторон от разрыва. Вопрос о точном механизме происхождения данных явлений остаётся открытым.

Полости в форшоке формируются при радиальных условиях в межпланетном магнитном поле, и для их образования не требуется наличия в нём разрыва. При данной конфигурации поля в форшоке возникает 2 типа волн: (1) альвеновские, распространяющиеся вдоль магнитного поля и имеющие круговую поляризацию и (2) линейно поляризованные волны, распространяющиеся под углом к магнитному полю. Так как эти волны сосуществуют в одном месте, то в результате их наложения, а также нелинейности, приводящей к дальнейшей эволюции фронтов, образуются полости, в которых наблюдается пониженная на ~50% концентрация частиц, а также значительно меньшая по сравнению с окружающей средой напряженность магнитного поля.

В главе 2 содержится исследование происхождения пучка горячей плазмы внутри АГП, зарегистрированной спутниковой группировкой Cluster 22 февраля 2006 года вблизи околоземной ударной волны при пересечении её фронта ТС. Данное событие было зарегистрировано всеми четырьмя спутниками группировки, на двух из которых была измерена динамика функция распределения ионов в поле зрения  $4\pi$  с временными разрешениями 4 и 12 секунд. Анализ функций распределения выявил наличие двух

популяций частиц, относящихся к солнечному ветру и к ионам АГП. Для каждой из этих популяций были отдельно рассчитаны основные моменты функции распределения, анализ которых подтвердил наличие у наблюдаемого явления основных характеристик АГП: (1) наличие горячего ядра, в котором концентрация частиц солнечного ветра на ~40% меньше, чем в окружающей среде; (2) наличие областей сжатия до и после регистрации ТС, в которых концентрация частиц солнечного ветра составляет  $\sim 2 \text{ см}^{-3}$  против  $\sim 1,5 \text{ см}^{-3}$  в окружающей среде, а напряженность магнитного поля возрастает с  $\sim 5 \text{ нТл}$  до  $\sim 8 \text{ нТл}$ ; (3) замедление потока солнечного ветра с  $\sim 690 \text{ км/с}$  до  $\sim 640 \text{ км/с}$ .

Для вычисления нормали к ТС были использованы 2 способа: (1) метод задержки в регистрации 4 аппаратами разрыва в магнитном поле, в предположении, что он является бесконечной плоскостью, сводящийся к решению системы из 3 линейных уравнений; (2) вычисление нормали к ТС на каждом аппарате в предположении тангенциального разрыва, сводящемуся к вычислению векторного произведения векторов магнитного поля до и после регистрации ТС. Углы поворота магнитного поля на разрыве, измеренные 4 аппаратами, составили  $14.5^\circ$ ,  $4.0^\circ$ ,  $9.0^\circ$  и  $11.4^\circ$ , соответственно. Несмотря на то, что эти величины малы, нормали, вычисленные по измерениям аппаратов С1, С2, С4, очень близки друг к другу, что подтверждает корректность вычисления ориентации ТС в предположении тангенциального разрыва. Значительное расхождение ориентаций, рассчитанных двумя способами (см. таблицу 1), объясняется удаленностью спутника С3 от остальных аппаратов группировки в момент измерения, а также тем, что профиль напряженности магнитного поля, измеренный этим аппаратом, существенно отличается от трёх других, что говорит о наличии возмущения в области нахождения аппарата С3 и свидетельствует о том, что предположение бесконечной плоскости на масштабах всей группировки является некорректным. Таким образом, для дальнейшей работы была использована нормаль к ТС, усредненная по измерениям на спутниках С1, С2, С4.

*Таблица 1. Нормаль к ТС, вычисленная различными способами.*

	$n_x$	$n_y$	$n_z$
С1	0.726	0.209	-0.656
С2	0.823	0.417	-0.384
С3	0.209	-0.414	-0.886
С4	0.858	0.476	-0.196
Среднее по С1, С2, С4	0.824	0.377	-0.423
Метод тайминга	0.083	0.966	-0.246

Анализ структуры пучка, прилегающего к ТС со стороны, соответствующей направлению его движения, выявил наличие двух особенностей: (1) угловой размер ионов наблюдаемого пучка увеличивается по мере приближения к ТС; (2) по мере приближения к ТС наблюдаются ионы всё меньших энергий, причем гирорадиусы самых энергичных

наблюдаемых ионов линейно зависят от расстояния до ТС. На основании этих наблюдений был сделан вывод о том, что пучок ионов АГП, наблюдаемый до пересечения с ТС, сформирован из происходящих из него замагниченных ионов, что является положением №2, выносимым на защиту.

Энергетический спектр ионов внутри ТС был сравнен со спектром частиц пучка АГП, встречным солнечному ветру, проинтегрированным за все время наблюдения до пересечения с ТС, а также со спектром частиц из магнитослоя, имеющих питч-углы, меньшие, чем  $90^\circ$ . Данное сравнение выявило значительное сходство всех 3 спектров. Этот факт, в сочетании с существенным преобладанием плазменного давления внутри АГП над магнитным, которое внутри АГП значительно понижено относительно окружающей среды, позволил сделать вывод о том, что ионы АГП происходят из магнитослоя через область пересечения с межпланетным ТС, что является положением №1, выносимым на защиту.

В главе 3 содержится произведенный впервые статистический анализ АГП у Марса по данным космического аппарата MAVEN. Всего для анализа было вручную отобрано 19 событий в период с декабря 2014 г. по апрель 2016 г. Данный период наблюдения обусловлен доступностью научных данных на период проведения исследования, для отбора событий использовался набор признаков, обсужденный в предыдущей главе. Для каждого события была рассчитана нормаль к связанному с ним ТС в предположении тангенциального разрыва, что дало данные для дальнейшего анализа, связанного с оценкой размеров событий и скоростей их распространения вдоль фронта ударной волны.

Для оценки скорости движения АГП были использованы соображения о том, что (1) АГП движется вместе с токовым слоем, который переносится солнечным ветром и (2) АГП движется вдоль фронта ударной волны. Данные утверждения могут быть формализованы в виде следующих выражений (Schwartz, и др., 2000):

$$\mathbf{V}_{tr} \cdot \mathbf{n}_{CS} = V_{SW} \cdot \mathbf{n}_{CS} \quad (1)$$

$$\mathbf{V}_{tr} \cdot \mathbf{n}_{BS} = 0 \quad (2)$$

где  $\mathbf{V}_{tr}$  - вектор скорости АГП,  $\mathbf{n}_{CS}$  - нормаль к ТС,  $\mathbf{n}_{BS}$  - нормаль к ударной волне в окрестности события, а  $V_{SW}$  - вектор скорости солнечного ветра. Решение данной системы уравнений относительно  $\mathbf{V}_{tr}$  даёт следующее выражение:

$$\mathbf{V}_{tr} = \frac{V_{SW} \cdot \mathbf{n}_{CS}}{\sin^2 \theta_{CS:BS}} \cdot (\mathbf{n}_{CS} - \cos \theta_{CS:BS} \mathbf{n}_{BS}) \quad (3)$$

где введено дополнительное обозначение  $\theta_{CS:BS}$  в качестве угла между нормальными к ТС и ударной волне.

Знание скорости распространения АГП позволило провести оценку размеров этих образований вдоль двух различных направлений. Первая оценка, названная в тексте диссертации как « $V_{tr}$  size» сделана путем умножения времени наблюдения события  $\tau$  на  $V_{tr}$ , и выражает размер АГП вдоль направления скорости её распространения. Вторая оценка, названная в тексте диссертации как « $n_{CS}$  size» сделана путем умножения  $\tau$  на  $(V_{SW} \cdot n_{CS})$  и выражает размер АГП в направлении, перпендикулярном плоскости ТС. Сравнения этих двух величин показали их приблизительное сходство, при этом размеры событий вдоль нормали к токовому слою иногда были меньше, чем их размеры вдоль скорости распространения, но не наоборот. Данное наблюдение в диссертации объясняется тем фактом, что АГП имеют тенденцию к вытягиванию вдоль ТС.

Анализ распределения скоростей АГП  $V_{tr}$  показал, что из 19 событий лишь 4 имеют положительную компоненту вдоль оси, направленной от Марса к Солнцу, что позволяет ввести предположение о том, что данные явления формируются на ударной волне в окрестности подсолнечной точки. На основании данного предположения была предложена методика оценки возраста АГП на момент регистрации как времени, которое проходит с момента пересечения ТС подсолнечной точке на ударной волне до момента пересечения ТС положения спутника. Данная величина была вычислена для всех 19 анализируемых событий.

Сравнительный анализ размеров АГП, их расстояния до ударной волны и их возраста на момент регистрации показал отсутствие зависимости между возрастом АГП и их размерами, что свидетельствует в пользу нестационарности данных образований. Также на основании приведенной выборки прослеживаются следующие тенденции: (1) наиболее широкие АГП наблюдаются вблизи ударной волны; (2) чем дальше от ударной волны наблюдаются АГП, тем больше их возраст на момент регистрации. Стоит отметить, выборка из 19 событий является недостаточной для выявления достоверных зависимостей, но приведенные данные могут быть дополнением статистики будущих исследований.

На основании числа зарегистрированных аппаратом MAVEN событий за изученный период наблюдений, а также времени, которое спутник провел в области, в которой могут формироваться АГП, была выполнена оценка частоты возникновения данных явлений у Марса, составившая  $\sim 0.6$  событий в день. Эта оценка, в совокупности с утверждением о нестационарности АГП у Марса, является положением №3, выносимым на защиту.

В главе 4 приводится анализ дневной магнитосферы Марса по данным спутника MAVEN, определяемой как область между обтекающим потоком солнечного ветра и ионосферой. Более строго, верхняя граница определяется по равенству концентраций протонов и суммы концентрации ионов  $O^+$  и  $O_2^+$ , а нижняя граница – по резкому уменьшению производной концентрации ионов  $O^+$  и  $O_2^+$  по высоте. Для анализа было отобрано 115 пересечений космическим аппаратом данной области на дневной стороне планеты при стационарных условиях в солнечном ветре. Пересечения отбирались только в северном полушарии планеты для исключения влияния областей остаточной намагниченности (в литературе также называемых «магнитными аномалиями») в коре планеты на измерения, так как почти все данные области сосредоточены в южном полушарии Марса. В диссертации представлен подробный анализ двух пересечений из отобранного списка.

Анализ функции распределения ионов по направлению скорости выявил наличие двух популяций частиц в области дневной магнитосферы: (1) разогретых частиц из верхней ионосферы; (2) захваченных и ускоренных солнечным ветром ионов из кислородной короны Марса. Так как Марс имеет протяженную корону из нейтральных атомов планетного происхождения, выходящую далеко за пределы головной ударной волны, часть этих атомов ионизируется посредством солнечного ультрафиолетового излучения и начинает циклоидальное движение в скрещенных электрическом и магнитном полях солнечного ветра. Как правило, до достижения планеты захваченные ионы не успевают совершить полного периода обращения, и их максимальная энергия на этот момент времени не превышает  $\sim 10$  кэВ, при этом максимальная скорость, до которой могут разгоняться ионы в результате этого процесса, равна двум скоростям солнечного ветра. Так как захват новых частиц происходит на разных расстояниях от планеты, в области магнитосферы наблюдаются ионы в различных фазах циклоидального движения, имеющие энергии от нескольких эВ до  $\sim 10$  кэВ.

Разделение двух популяций частиц в области дневной магнитосферы по направлению скорости позволило посчитать отдельно основные моменты их функции распределения и на основании полученных данных вычислить их давления. Были построены временные зависимости суммы теплового  $nkT$  и динамического  $\rho v^2/2$  давлений захваченных частиц, а также теплового давления ионосферы. Сравнение этих двух величин показало их равенство в области дневной магнитосферы.

Наличие двух популяций частиц в области между обтекающим Марс потоком солнечного ветра и ионосферой, а также равенство их давлений в этой области является положением №4, выносимым на защиту.

## Заключение

В диссертации представлены результаты исследования мелкомасштабных плазменных процессов, играющих большую роль при образовании характерных структур при взаимодействии солнечного ветра с оболочками планет: головной ударной волной и ионосферой планеты, не имеющей собственного глобального магнитного поля:

- аномалии горячего потока, зарегистрированной спутниковой группировкой Cluster, у ударной волны магнитосферы Земли 22 февраля 2006 года
- статистический анализ 19 АГП у Марса, зарегистрированных аппаратом MAVEN,
- структуры и ионного состава области между ионосферой Марса и обтекающим его потоком солнечного ветра.

В главе 2 данной диссертации приведено исследование популяции частиц внутри ТС, связанного с АГП у Земли, а также прилегающего к нему пучка ионов. Выявлено, что причиной возникновения данной АГП является выход протонов обтекающего потока за ударную волну магнитосферы Земли по направлению к Солнцу через область пересечения ТС и ударной волны за счёт уменьшения магнитного давления со стороны солнечного ветра внутри ТС. Показано, что дальнейшее распространение частиц ядра аномалии происходит вдоль ТС, а прилегающий к нему пучок ионов сформирован из тех частиц ядра аномалии, чей гирорадиус превышает толщину ТС. Выявление еще одного механизма формирования АГП, представленного в главе 2, свидетельствует о том, что природа данных событий разнообразна, и дает данные для построений новых моделей их возникновения, с помощью которых в будущем можно лучше изучить ряд характеристик АГП и особенностей их появления.

В 3 главе диссертации представлен впервые произведенный статистический анализ АГП у Марса. Доказано, что данный тип форшок-транзиентов является распространенным на этой планете и определена частота их возникновения, составляющая 0,6 событий в день. Предложено два метода оценки размеров АГП: вдоль нормали к ТС и вдоль направления скорости транзита события по фронту ударной волны. Сравнения этих двух размеров показали, что размеры событий вдоль нормали к ТС иногда меньше, чем их размеры вдоль скорости распространения, но не наоборот. Это связано с тем, что АГП имеют тенденцию к вытягиванию вдоль поверхности ТС, что подтверждает результат, полученный в главе 2. Результаты, приведенные в данной главе, подтверждают универсальность явления АГП и то, что они могут возникать на любых типах межпланетных и, возможно, даже межзвездных ударных волнах.

В 4 главе диссертации по результатам анализа 115 орбит спутника MAVEN на дневной стороне в северном полушарии впервые показано постоянное существование дневной магнитосферы Марса, представляющую собой область в верхней части дневной ионосферы, содержащей разогретые частицы  $O^+$  и  $O_2^+$  ионосферы и захваченные и ускоренные солнечным ветром ионы кислородной короны Марса. Выявлено равенство суммы теплового и динамического давлений захваченных частиц и теплового давления ионосферы.

### **Список цитируемой литературы**

1. Collinson, G., et al. (2015), A hot flow anomaly at Mars, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 9121–9127, doi:10.1002/2015GL065079
2. Jacobsen, K. S., et al. (2009), THEMIS observations of extrememagnetopause motion caused by a hot flow anomaly, *J. Geophys. Res.*, 114, A08210
3. Schwartz S.J., Paschmann G., Sckopke N., Bauer T.M., Dunlop M., Fazakerley A.N., Thomsen M. F., (2000) Conditions for the formation of hot flow anomalies at Earth's bow shock, *J. Geophys. Res.*, VOL.105, NO. A6, PP. 12,639-12,650
4. Smith (2001), The heliospheric current sheet, *J. Geophys. Res.*, 106(A8), 15,819–15,831, doi: 10.1029/2000JA000120
5. Szego, K., Klimov, S., Kotova, G.A., Livi, S., Rosenbauer, H., Skalsky, A., Verigin, M.I., 1998, On the dayside region between the shocked solar wind and the ionosphere of Mars, *J.G.R.*, 103 (A5), 9101-9111
6. Tsurutani, B. T., E. J. Smith, C. M. Ho, M. Neugebauer, B. E. Goldstein, J. S. Mok, A. Balogh, D. Southwood, and W. C. Feldman, Interplanetary discontinuities and Alfvén waves, *Space Sci. Rev.*, 72, 205 - 210, doi:10.1007/BF00768781, 1995
7. Turner, D. L., S. Eriksson, T. D. Phan, V. Angelopoulos, W. Tu, W. Liu, X. Li, W.-L. The, J. P. McFadden, and K.-H. Glassmeier (2011), Multispacecraft observations of a foreshock-induced magnetopause disturbance exhibiting distinct plasma flows and an intense density compression, *J. Geophys. Res.*, 116, A04230
8. Vaisberg, O. L, 1976. Mars-plasma environment. In: Williams, D.J. (Ed.), *Physics of the Solar Planetary Environment*. AGU, Boulder, pp. 854-871
9. Zelenyi, L. M., & Vaisberg, O. L. (1985). Venusian interaction with the solar wind plasma flow as a limiting case of the cometary type interaction. In Buti (Ed.), *Advances of space plasma physics* (pp. 59–76). Trieste: World Scientific