

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Шувалов Сергей Дмитриевич

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

Специальность 01.03.03 – «Физика Солнца»

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук,

Профессор Вайсберг Олег Леонидович

Москва - 2022

Оглавление

Введение.....	4
Актуальность темы исследования	4
Цели и задачи диссертационной работы	5
Научная новизна	6
Теоретическая и практическая значимость работы	6
Методология и методы исследования	6
Положения, выносимые на защиту.....	7
Личный вклад автора.....	8
Степень достоверности и апробация результатов.....	9
Глава 1. Форшок-транзиенты и дневная магнитосфера Марса.	10
1.1 Форшок-транзиенты у головных ударных волн планет	10
1.1.1 Пузыри в форшоке (foreshock bubbles)	11
1.1.2. Аномалии горячего потока	15
1.1.3 Полости в форшоке (foreshock cavities).....	21
Глава 2. Происхождение пучка ионов молодой аномалии горячего потока у Земли.....	23
2.1 Введение	23
2.2 Используемые данные.....	24
2.3 Наблюдения.....	26
2.4 Анализ.....	29
2.5 Обсуждение результатов.....	40
2.6 Выводы главы 2	42
Глава 3. Характеристики аномалий горячего потока у Марса	43
3.1 Введение	43
3.2 Используемые данные.....	43
3.3 Наблюдения.....	44
3.3.1 Пример молодой АГП	45
3.3.2 Пример зрелой АГП.....	47
3.4 Анализ.....	50
3.4.1 Определение нормалей к токовым слоям	50
3.4.2 Определение типа ударной волны.....	50
3.4.3 Оценка скорости АГП	51
3.4.4 Размер АГП.....	52
3.4.5 Расстояние до ударной волны.....	53

3.4.6 Пространственное распределение событий	53
3.4.7 Оценка времени жизни АГП.....	54
3.4.8 Оценка частоты встречаемости АГП у Марса	55
3.5 Обсуждение результатов.....	56
3.6 Выводы главы 3	58
Глава 4. Дневная магнитосфера Марса	59
4.1 Введение	59
4.2 Наблюдения.....	62
4.3 Анализ.....	65
4.4 Обсуждение.....	71
4.5 Выводы главы 4	73
Заключение	75
Список сокращений	77
Доклады на конференциях по теме диссертации	79
Список публикаций автора.....	80
Публикации по теме диссертации.....	80
Прочие публикации	80
Библиографический список используемой литературы.....	83
Приложение 1. Формулы для расчёта моментов функции распределения по данным прибора CIS2/HIA.	90
Приложение 2. Список атрибутов событий АГП, рассмотренных в главе 3.	92
Приложение 3. Список времен пересечений аппаратом MAVEN дневной магнитосферы Марса, использованный в главе 4.....	98

Введение

Актуальность темы исследования

Перед фронтом головной ударной волны Земли присутствует сильно возмущенная область, 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 (Вайсберг 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 быстроедействие 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 и задачи диссертационной 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 значимость 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 токового слоя позволили сделать вывод о структуре пучка в области, прилегающей к токовому слою и в самом токовом слое.

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° . 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.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты, изложенные в данной диссертации, были доложены на 8 международных конференциях, также по материалам изложенных работ были опубликованы 3 статьи в иностранных журналах. Полные списки опубликованных статей и сделанных докладов приведены в соответствующих разделах.

Глава 1. Форшок-транзиенты и дневная магнитосфера Марса.

1.1 Форшок-транзиенты у головных ударных волн планет

Солнечный ветер представляет собой сверхзвуковой поток плазмы, почти радиально истекающей от Солнца и преимущественно состоящей из протонов и электронов. При встрече с препятствием, роль которого, в случае Земли, играет магнитное поле планеты, солнечный ветер замедляется, становясь дозвуковым, и начинает его обтекать, в результате чего формируется бесстолкновительная ударная волна, называемая головной, на которой скачкообразно меняются скорость, температура и концентрация плазмы. Фронт околоземной ударной волны отстоит от Земли в направлении Солнца на расстоянии в среднем ~ 12 радиусов планеты и в хорошем приближении представляет собой поверхность второго порядка (Formisano и др., 1979), положение которой меняется в зависимости от динамического давления солнечного ветра. Помимо замедления, отклонения и разогрева набегающего потока солнечного ветра, на ударной волне также протекают нетепловые процессы, включающие выборочное ускорение частиц до высоких энергий, развитие неустойчивостей и формирование немаксвелловских функций распределения (Paschmann и др., 2005; Tsurutani и Stone, 1985; Burgess и Scholer, 2015).

Ориентация вектора межпланетного магнитного поля играет ключевую роль в физике головной ударной волны. При квази-перпендикулярной геометрии, когда угол $\theta_{Вн}$ между вектором магнитного поля и нормалью к фронту ударной волны $> 45^\circ$, и Альвеновское число Маха ≥ 3 , ударная волна является сверхкритической. Часть ионов из набегающего потока частиц отражаются от фронта ударной волны и в дальнейшем дрейфуют вдоль направления вектора магнитного поля в область обтекающего потока за ударной волной. Данный механизм превращает энергию направленного движения потока в его тепловую энергию.

При квази-параллельной геометрии ($\theta_{Вн} < 45^\circ$) значительная часть ионов и электронов может дрейфовать от ударной волны вдоль вектора магнитного поля в направлении, противоположном набегающему потоку солнечного ветра. Эти надтепловые частицы формируют протяженную область перед фронтом ударной волны, в которой наблюдается множество волн, известную как форшок (Fuselier, 1995; Eastwood и др., 2005). В форшоке происходит развитие кинетических неустойчивостей в плазме набегающего потока солнечного ветра, и генерируются волны, приводящие к дополнительному рассеянию частиц. Примером таких волн могут быть очень низкочастотные (ОНЧ) волны, в литературе называемые кавитонами форшока (foreshock cavitons, см. например, Blanco-Cano и др., 2009; данный термин не следует путать с полостями в форшоке, foreshock cavities, которым посвящён отдельный раздел данной главы). Также иногда развиваются нелинейные волны, в которых происходит значительное увеличение крутизны фронтов, в результате чего образуются так называемые

короткие магнитные структуры с большой амплитудой (Short Large Amplitude Magnetic Structures (SLAMS), Schwartz и Burgess, 1991). Недавнее исследование (Chen и др., 2021) показало, что развитие SLAMS происходит из-за гиро-резонанса между ионами солнечного ветра и распространяющимися им навстречу электромагнитными волнами. SLAMS у околосолнечной ударной волны имеют размер порядка одного радиуса планеты, и их пространственная плотность растет с уменьшением расстояния до планеты. По мере возрастания пространственной плотности, эти структуры начинают накладываться друг на друга, замещая собой фронт ударной волны.

Наиболее крупными из известных образований, формируемых в форшоке, являются: (1) пузыри в форшоке (foreshock bubbles, предсказаны моделированием Omidí и др., 2010, и затем зарегистрированы аппаратом THEMIS (Turner и др., 2013)), которые представляют собой крупномасштабные кинетические образования, возникающие в результате взаимодействия разрывов в солнечном ветре и отраженными от ударной волны надтепловыми частицами; (2) Аномалии Горячего Потока (hot flow anomalies, АГП, Schwartz и др., 1985, Thomsen и др., 1986; Paschmann и др., 1988), которые возникают в результате взаимодействия тангенциального разрыва в межпланетном магнитном поле с квази-параллельной ударной волной (в ранних работах данные явления иногда назывались активными токовыми слоями); (3) полости в форшоке (foreshock cavities, Sibeck и др., 2002), являющиеся локализованными образованиями, содержащими горячую плазму, почти полностью вытесняющими солнечный ветер и образующимися вне зависимости от разрывов в солнечном ветре. В литературе все вышеперечисленные образования иногда называют собирательным термином «форшок-транзиенты» (foreshock transients или transient foreshock event, см., например, Turner и др., 2013). Далее каждое из приведенных образований рассмотрено более подробно.

1.1.1 Пузыри в форшоке (foreshock bubbles)

В работе Omidí и др., 2010 с использованием гибридных симуляций было предсказано, что пузыри в форшоке формируются в результате кинетического взаимодействия между надтепловыми частицами, движущимися от ударной волны, и набегающим потоком солнечного ветра, содержащего неоднородности магнитного поля. Эти неоднородности отклоняют ионы форшока, из-за чего формируется ядро пузыря, представляющее собой область с пониженной концентрацией частиц, ослабленным магнитным полем и температурой плазмы, на несколько порядков превышающей температуру в солнечном ветре, направление средней скорости которой сильно отличается от направления солнечного ветра и иногда даже близко к направлению на Солнце. Также в ядре пузыря наблюдается повышенная активность ОНЧ волн. На рис. 1.1 приведен результат гибридной симуляции пузыря в форшоке, находящегося вблизи

подсолнечной точки Земли непосредственно перед его соприкосновением с головной ударной волной. Образование ядра пузыря, отмеченного как «FB», зависит от разрывов в межпланетном магнитном поле, в котором находятся исходящие от ударной волны ионы: если на этом разрыве замедляется значительная часть этих надтепловых частиц, то они сосредотачиваются перед ним. Пузырь формируется только в том случае, если приток надтепловых частиц со стороны ударной волны в область ядра (т.е. количество частиц, скорости которых направлены против движения солнечного ветра, пересекающих элемент площади, лежащей в плоскости разрыва в единицу времени) превосходит отток частиц перед разрывом.

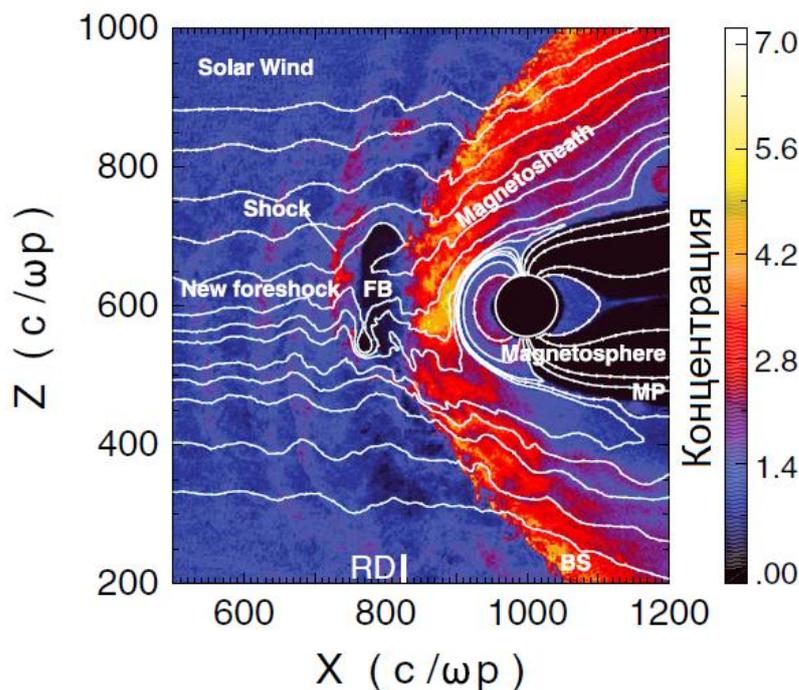


Рисунок 1.1. Результат гибридного моделирования (Omid *и др.*, 2010) пузыря в форшоке, цветом обозначена концентрация частиц, нормированная по солнечному ветру, белыми линиями – силовые линии магнитного поля. Размерность осей X и Z представлена в толщине скин-слоя c/ω_p (c – скорость света, ω_p – плазменная частота). Белая окружность вокруг Земли показывает внутреннюю границу симуляции. RD – положение вращательного разрыва в межпланетном магнитном поле, где ориентация вектора магнитного поля поменялась с $[1, 0, 0]$ на $[1, -5, 0]$ в координатах XYZ , что привело к образованию пузыря в форшоке (Turner *и др.*, 2013).

На рис. 1.2 представлен пример сценария формирования пузыря в форшоке из-за изменения электрического поля в солнечном ветре на вращательном разрыве. Это лишь один из множества возможных сценариев, общий критерий для формирования подобных образований до сих пор не сформулирован. Выше разрыва пузыри в форшоке увеличиваются в размере по мере того, как всё большее количество частиц из форшока прибывает в область ядра.

Повышенная концентрация надтепловой плазмы приводит к её разогреву и дальнейшему расширению. Расширение порождает значительные отклонения скоростей потоков, разреженную плазму и пониженную напряженность магнитного поля в ядре и области сжатия с повышенной концентрацией и напряженностью магнитного поля (из-за условия вмороженности поля солнечного ветра) в прилегающей области со стороны Солнца. Набегающий поток солнечного ветра, падающий на пузырь, претерпевает изменение скорости, концентрации и магнитного поля, что приводит к формированию магнитозвуковой ударной волны на переднем крае области сжатия. Эта ударная волна также является частью структуры пузыря (см. рис. 1.1), и всё образование начинает дрейфовать вместе с солнечным ветром приблизительно в анти-солнечном направлении. На рис. 1.2 приведена схематичная иллюстрация сценария формирования пузыря в форшоке в случае, когда межпланетное магнитное поле меняется от чисто радиального к менее радиальному на вращательном разрыве (RD). Скорости плазмы отмечены синими стрелками, линии магнитного поля – зелёным. В данном примере пузырь формируется из-за изменения в электрическом поле солнечного ветра (E_{conv}) выше разрыва, из-за чего приток частиц в область ядра превосходит отток ($J_{out} < J_{in}$). Это происходит из-за того, что электрическое поле по-разному отклоняет скорости ионов разных энергий. Рост концентрации частиц в ядре быстро приводит к росту температуры перед разрывом, вследствие чего горячая плазма расширяется, уменьшая концентрацию и напряженность поля (согласно условию вмороженности), и формирует области сжатия по краям (Turner и др., 2013)

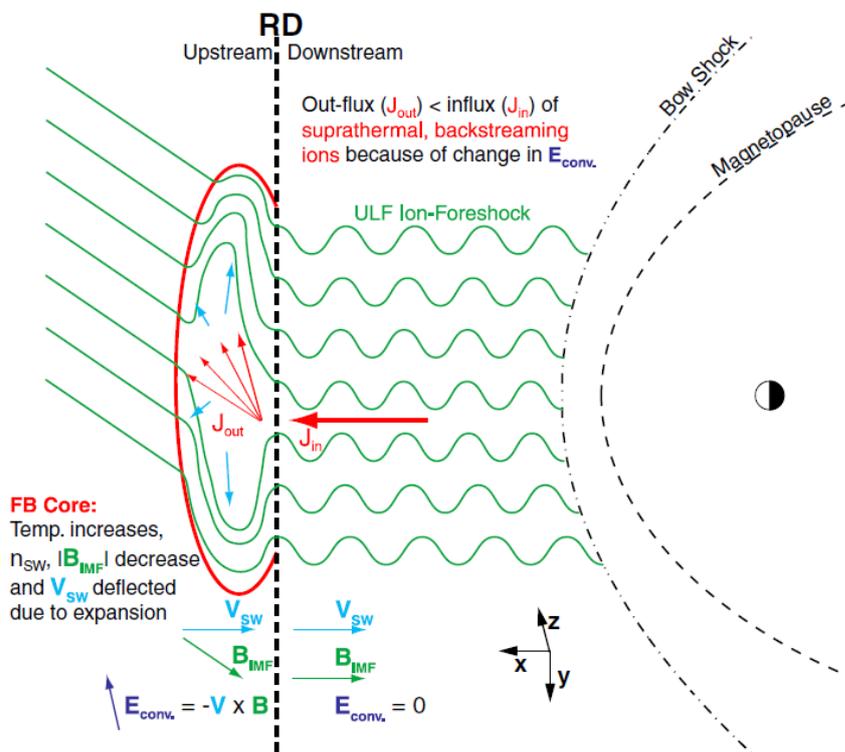


Рисунок 1.2. Схематичное изображение сценария формирования пузыря в форшоке.

Несмотря на то, что пузыри в форшоке могут формироваться для множества ориентаций межпланетного магнитного поля и вращательного разрыва, они могут оказывать влияние на магнитосферу только на дневной стороне, то есть при условии малости угла ($\leq 45^\circ$) между скоростью солнечного ветра и направлением межпланетного магнитного поля ниже по течению солнечного ветра от пузыря. В направлении, перпендикулярном скорости солнечного ветра, пузыри в форшоке имеют размеры, сопоставимые с ионным форшоком, соответствующие десяткам радиусам планеты в случае Земли. В направлении скорости солнечного ветра, эти образования имеют масштаб ~ 10 земных радиусов.

Космический аппарат при наблюдении пузыря в форшоке, двигающегося в анти-солнечном направлении, будет сначала регистрировать ядро, в котором присутствуют разнонаправленные потоки частиц с высокой температурой, пониженной концентрацией и напряженностью магнитного поля, а затем ударную волну, расположенную перед ядром, с повышенными концентрациями и напряженностью магнитного поля. При этом вращательный разрыв в межпланетном магнитном поле, связанный с событием, может быть неразличим из-за высокой активности ОНЧ волн в первоначальном форшоке и в ядре пузыря. Когда пузырь в процессе дрейфа достигает магнитосферы, пониженная плотность частиц и напряженность поля в ядре заставляют плазму двигаться в направлении Солнца к обтекающему потоку, в то время как повышенная концентрация и давление в области сжатия приводят к внезапному сжатию магнитосферы. Следствия этих изменений могут наблюдаться по измерениям магнитного поля в дневной магнитосфере. Так как пузыри в форшоке подразумевают наличие двух сходящихся ударных волн (одной перед ядром пузыря и второй – планетной головной ударной волной), в них могут происходить процессы ускорения частиц механизмами Ферми и отражением от ударной волны.

В (Omidì и др., 2021) представлены результаты гибридного моделирования, в котором изучалось ускорение частиц в пузырях в форшоке на различных солнечно-зенитных углах (угол между радиус-вектором к точке наблюдения из центра планеты и направлением на Солнце). Моделирование показало, что для фиксированной скорости солнечного ветра максимальная энергия, до которой происходит ускорение частиц, сходна для всех углов. Также было показано, что на малых солнечно-зенитных углах (вблизи прямой, соединяющей Землю и Солнце) частицы захватываются в форшоке, что приводит к тому, что концентрация частиц в форшоке почти достигает концентрации частиц в ядре пузыря. С увеличением солнечно-зенитного угла захват частиц между ядром пузыря и фронтом ударной волны становится менее эффективным, и, как следствие, меньшее количество частиц ускоряется при столкновении ядра пузыря с фронтом ударной волны.

Также в этом исследовании показано, что максимальная энергия, до которой происходит ускорение частиц, определяется скоростью солнечного ветра, и составляет $\sim 5.6 E_{sw}$, где E_{sw} – энергия солнечного ветра. Процесс ускорения осуществляется путем однократного или многократного отражения частиц, двигающихся в направлении Солнца, на ядре пузыря и кавитонах (разновидность ОНЧ-волн в форшоке между ударной волной и пузырём) посредством ускорения Ферми II рода.

1.1.2. Аномалии горячего потока

Аномалии горячего потока (или активные ТС, как их называют в ранних работах, см., например, Schwartz и др., 1985) имеют множество сходств с пузырями в форшоке, среди которых связь с разрывом в межпланетном магнитном поле, высокие температуры, низкая концентрация плазмы и ослабленная напряженность магнитного поля в ядре, наличие областей сжатия с одной или двух сторон от ядра, и времена наблюдения от 1 до нескольких минут (Fascko и др., 2008). Эти сходства во многом объясняют причину, по которой пузыри в форшоке как отдельное явление были выделены лишь в начале 2010-х. 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. Когда это происходит, надтепловые частицы накапливаются в области разрыва, что приводит к значительному росту температуры и теплового давления в районе пересечения разрыва и ударной волны. В результате этого процесса плазма начинает расширяться для поддержания баланса давлений, что приводит к ослаблению магнитного поля и уменьшению концентрации частиц в ядре АГП. При этом вокруг ядра присутствует одна или несколько областей сжатия, которые могут формировать ударные волны, в зависимости от геометрии АГП и её движения относительно набегающего потока солнечного ветра.

Почти сразу после открытия АГП (или активных ТС), пучок, приходящий со стороны ударной волны, был отнесен к одному из факторов их развития. В работе Pashmann и др., 1988 отмечается, что взаимодействие ударной волны с ТС, имеющим специфическую внутреннюю структуру, приводит к появлению локализованного пучка, исходящего со стороны ударной волны.

В статье Burgess и Schwartz, 1988 было высказано предположение о том, что поток ионов, исходящий от ударной волны в месте наблюдения АГП сформирован из отраженных от ударной волны частиц набегающего потока солнечного ветра в области пересечения ударной волны с ТС, в котором присутствует область с уменьшенной напряженностью магнитного поля.

В статье Schwartz и др, 1988 предполагается, что подобные события являются прямым результатом разрушения и реорганизации фронта ударной волны из-за прохождения по нему межпланетного ТС, который вероятнее всего является тангенциальным разрывом.

В работе Burgess, 1989 изучается поведение тестовых частиц солнечного ветра, зеркально отражённых в месте пересечения ТС с квази-перпендикулярной ударной волной (рисунок 1.3). В статье заключается, что формирование активного ТС происходит при наличии больших плотностей частиц, отраженных в точке контакта ТС и ударной волны. Неравновесное поведение, происходящее по причине истощения вращающихся в магнитном поле частиц, также может приводить к подобному переотражению.

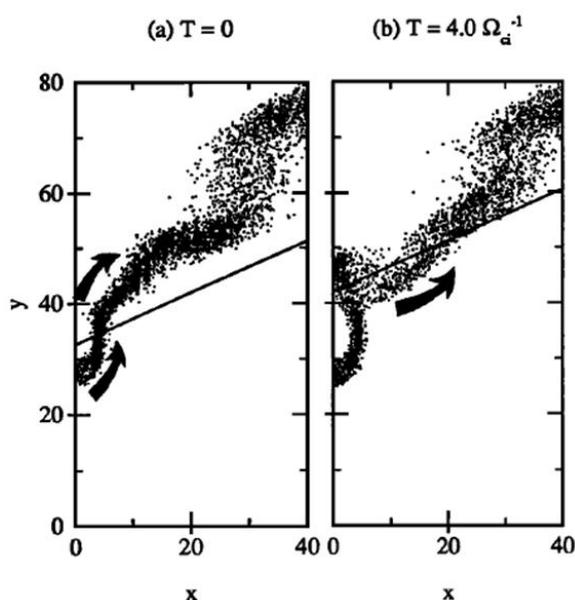


Рисунок 1.3. Моделирование поведения частиц солнечного ветра, отражённых от ударной волны в различные моменты времени (a) и (b). Прямой линией обозначен ТС, точками – промоделированные ионы, распространяющиеся от ударной волны, стрелки указывают на направление их скоростей (Burgess, 1989)

Thomas и Brecht, 1988 изучали неустойчивость, возникающую при взаимодействии отраженного пучка с солнечным ветром. Они обнаружили, что при большом значении β в диамагнитной полости, образованной уменьшенной напряженностью магнитного поля и плотностью частиц, из-за электромагнитной неустойчивости формируется пучок конечной ширины.

В глобальном гибридном моделировании, проведённом (Omid and Sibeck, 2007) выявлено, что аномалия горячего потока формируется, когда тангенциальный разрыв проходит через квази-параллельную ударную волну, что позволяет частицам пересечь ударную волну со стороны Земли.

Надтепловые ионы с внешней стороны ударной волны могут также происходить в результате утечек со стороны набегающих частиц. Эти процессы были изучены в (Edmiston et al., 1982) для различных значений $\theta_{Вн}$. Результаты показывают, что утечка ионов может происходить при угле $\theta_{Вн}$, достигающем 65° при определенных условиях. Позже (Lui and Kan, 1990) представили результаты симуляции для утечек ионов набегающего потока и отражений на квази-параллельной ударной волне, полученных с помощью одномерной гибридной модели. Результаты указывают на то, что доля частиц, образованная утечкой ионов, превалирует в областях с $\theta_{Вн} \sim 10^\circ$. (Thomsen et al., 1983) также показал, что частицы, утекшие из магнитослоя параллельно нормали к ударной волне, возвращаются к ней обратно для $\theta_{Вн} > 65^\circ$, но имеют недостаточную энергию для того, чтобы вновь её пересечь.

В (Tjulin et al., 2009) приведён анализ распределения скоростей надтеплого диспергированного ионного пучка, наблюдаемого в АГП. В этой работе представлена модель формирования питч-углового и гирофазового распределения частиц в предположении, что ТС является бесконечно тонким. В обсуждении представлены относительно жёсткие ограничения, в которых данная модель может работать, включая ограничения на $\theta_{Вн}$ и близость космического аппарата к ударной волне.

На рисунке 1.4 представлен результат гибридной симуляции (Omidì и Sibeck, 2007) полностью развитой АГП, которая сформировалась в процессе взаимодействия тангенциального разрыва с головной ударной волной Земли.

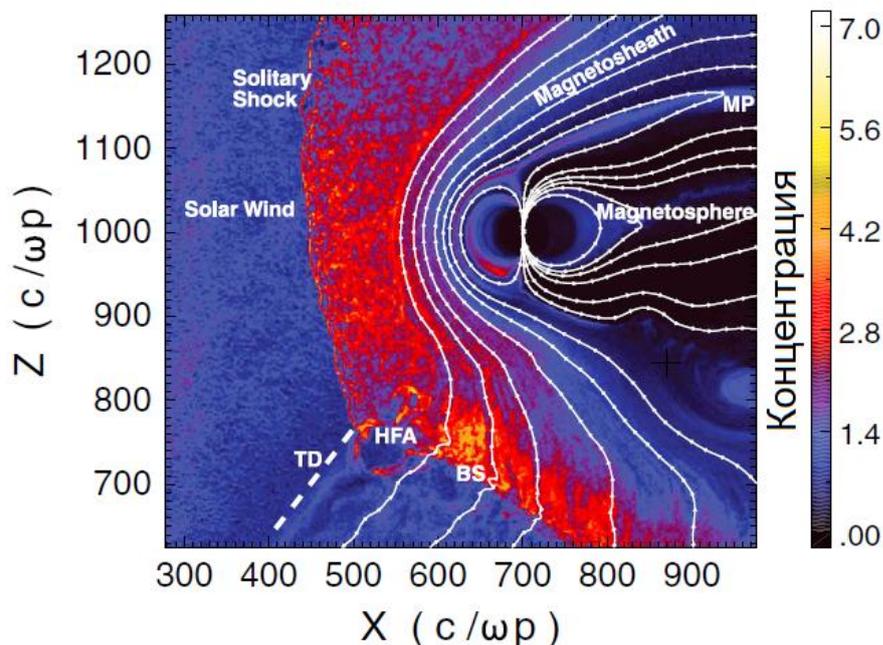


Рисунок 1.4. Результат гибридного моделирования (Omidì и Sibeck, 2007) процесса формирования АГП. Обозначения те же, что и на рис. 1.1, за исключением тангенциального разрыва (TD) вместо вращательного (Turner и др., 2013).

Несмотря на большое количество сходств между АГП и пузырями в форшоке, механизмы формирования и структуры этих образований различны. АГП движутся вместе с солнечным ветром вдоль линии пересечения головной ударной волны и разрыва в магнитном поле. Таким образом, их скорость и время наблюдения спутником полностью зависят от ориентации разрыва относительно местной нормали к ударной волне и условий в солнечном ветре. Проведенные симуляции (Schwartz, 1995; Omid *и* Sibeck, 2007) показывают, что размеры АГП не превышают нескольких земных радиусов как вдоль нормали к ТС, так и вдоль нормали к ударной волне, но они вытянуты вдоль линии пересечения разрыва с ударной волной.

В работе (Turner *и др.*, 2013) приводятся следующие критерии отличия АГП от пузырей в форшоке:

1. Формирование АГП подразумевает пересечение разрывом в межпланетном магнитном поле фронта головной ударной волны, в то время как при формировании пузыря в форшоке это необязательно.
2. АГП могут формироваться как выше по направлению скорости солнечного ветра от разрыва (если прохождение разрыва изменяет ударную волну с квази-перпендикулярной на квази-параллельную), ниже разрыва (в обратном случае), так и внутри разрыва (если ударная волна квази-параллельна с двух сторон от него), который является тангенциальным или вращательным. Пузыри в форшоке формируются только выше по направлению скорости солнечного ветра от некоторых вращательных разрывов.
3. Размеры пузырей в форшоке могут достигать более десяти земных радиусов и могут формироваться на значительном удалении от фронта головной ударной волны. АГП, напротив, имеют размер, не превышающий единиц радиусов Земли по направлению нормали разрыва, и они оказывают влияние на плазму перед ударной волной на расстоянии, не превышающем тот же масштаб.
4. Пузыри в форшоке дрейфуют вместе с направлением скорости солнечного ветра, в то время как АГП распространяются вместе с линией пересечения разрыва и ударной волны.
5. Для формирования АГП необходимо, чтобы электрическое поле было направлено к разрыву с одной или двух сторон от него.
6. За исключением экстремальных случаев, когда отношение концентрации отраженных от ударной волны частиц к концентрации набегающего потока превышает ~65% (Thomsen *и др.*, 1988), АГП с двух сторон окружены областями сжатия, которые в некоторых случаях могут формировать свои ударные волны. Пузыри в форшоке

имеют только одну область сжатия со стороны солнечного ветра, которая в определенных условиях также формирует ударную волну.

7. Нормаль к ударной волне или области сжатия перед пузырьком в форшоке должна иметь доминантную, либо значительную компоненту вдоль оси «Солнце-планета», в то время как ориентация областей сжатия/ударных волн вокруг АГП может быть достаточно произвольной.

В работе Xiao и др., 2015 был проведен анализ нескольких десятков молодых АГП по наблюдениям 4-спутниковой группировки Cluster, у каждой из которых наблюдались хорошо выделяемые области сжатия с обеих сторон от ядра. Используя методы вычисления скоростей разрывов по многоточечным измерениям, были рассчитаны векторы скоростей фронтов каждой области сжатия, в результате чего все анализируемые события были разделены на расширяющиеся, сужающиеся и стабильные, в зависимости от разницы скоростей обеих областей сжатия каждого из событий. При этом скорости сужения событий составили ~ 10 км/с, а скорости расширения – от ~ 10 до ~ 100 км/с. Было выявлено, что в $\sim 70\%$ случаев сумма теплового и магнитного давлений внутри АГП было больше давления в окружающем солнечном ветре для расширяющихся событий и меньше – для сужающихся.

Недавние наблюдения АГП у Земли спутниковой группировкой MMS показали, что в определенных условиях в них может происходить ускорение частиц солнечного ветра с единиц кэВ до почти МэВ посредством механизма ускорения Ферми I рода (Turner et al., 2018). Это позволяет предположить важную роль АГП в формировании космических лучей на астрофизических ударных волнах во всем космическом пространстве.

Будучи открытыми в 1980-х годах по данным измерений космического аппарата AMPTE, АГП широко изучались у Земли с помощью таких миссий, как ISEE (Thomsen и др., 1986), Интербол (Вайсберг и др., 1999), Cluster (Facsko и др., 2009; Lucek и др., 2004), THEMIS (Eastwood и др., 2008; Zhang и др., 2010) и MMS (Turner и др., 2018). АГП также были обнаружены у Меркурия (Uritsky и др., 2014), Венеры (Slavin и др., 2009; Collinson и др., 2012, 2014), Юпитера (Valek et al., 2017) и Сатурна (Masters et al., 2008, 2009), что доказывает универсальность данного явления.

На основании сравнения размеров АГП у Меркурия, Венеры, Земли, Марса¹ и Сатурна Uritsky и др., 2014, высказали предположение о том, что размер АГП может быть связан либо с размером головной ударной волны планеты, либо с расстоянием до Солнца. Вторая гипотеза основывалась на том, что с увеличением расстояния до Солнца уменьшается напряженность

¹ По состоянию на 2014 год наблюдаемые на Марсе структуры могли быть лишь предположительно отнесены к АГП из-за отсутствия на тот момент одновременных измерений ионов и магнитного поля.

магнитного поля в солнечном ветре, и, как следствие, увеличивается масштаб происходящих в нем явлений. Так, средний размер АГП у планет, перечисленных выше, колебался от ~140 до ~290 гирорадиусов ионов в солнечном ветре. Однако АГП, впервые зарегистрированная в 2017 году на Юпитере, оказалась настолько огромной (рис. 1.4), что её размер составил ~15 000 гирорадиусов, что в 5 раз превышает размер самых больших АГП, зарегистрированных на других планетах (~3 000 гирорадиусов). Включение АГП, зарегистрированной на Юпитере, в статистику размеров этих явлений на разных планетах (рис. 1.5) позволило сделать вывод о том, что за их размер, скорее всего, отвечает масштаб соответствующей головной ударной волны.

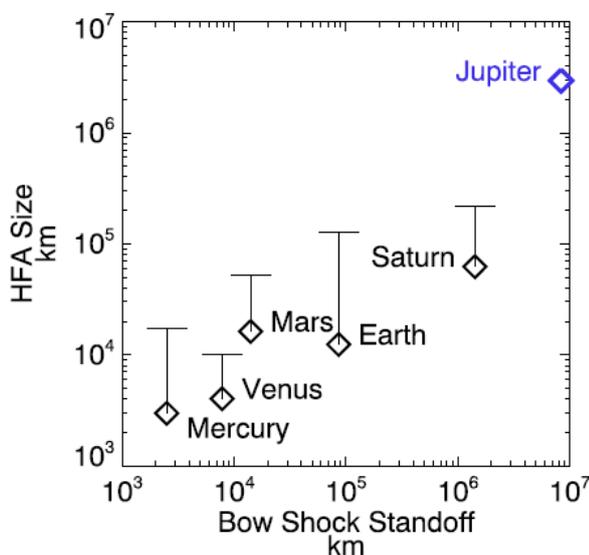


Рисунок 1.5. Зависимость среднего размера АГП от расстояния между планетой и головной ударной волной для различных планет. Максимальные размеры АГП, зарегистрированных у каждой из планет, отмечены засечкой (Valek, 2017).

Первая возможная регистрация АГП на Марсе описана в статье Øieroset и др., 2001, по данным спутника Mars Global Surveyor. К сожалению, на аппарате отсутствовал ионный спектрометр, необходимый для однозначной идентификации данного явления. Только в ноябре 2014 года, когда космический аппарат MAVEN с комплексом плазменной аппаратуры высокого временного разрешения был выведен на марсианскую орбиту, появилась возможность сделать уверенный вывод о том, что АГП присутствуют на Марсе, о чем доложено в работе Collinson и др., 2015.

Как уже упоминалось, к моменту написания текста данной диссертации АГП обнаружены у всех планет солнечной системы, за исключением Урана и Нептуна, однако статистических исследований этих событий на Марсе до сих пор не проводилось. Так как головная ударная волна Марса находится на порядок ближе к планете, чем земная, то можно

предположить, что форшок-транзиенты у Марса приводят к глобальным изменениям в плазменной оболочке планеты. Так, например, по оценке Collinson et al., 2015, одна из марсианских АГП вызвала поднятие ионосферы планеты на ~40 км, что, при средней высоте верхней границы ионосферы Марса в 250 км, является существенным.

1.1.3 Полости в форшоке (foreshock cavities)

Полости в форшоке представляют собой области нагретой плазмы солнечного ветра с пониженной концентрацией частиц и напряженностью магнитного поля, внутри которых наблюдается развитая волновая активность. Эти области ограничены пограничными слоями с повышенной напряженностью магнитного поля и плотностью плазмы, называемыми foreshock compressional boundary (FCB, граница сжатия в форшоке, рис. 1.6). Полости в форшоке имеют размер около 30 земных радиусов (Lin, 2003; Omid, 2007a; Turc и др., 2018), и продолжительность их регистрации околоземными спутниками составляет от 5 минут.

Данные образования формируются при радиальных условиях в межпланетном магнитном поле (когда силовые линии поля приблизительно параллельны вектору скорости солнечного ветра). В моделировании, проведенном Omid 2007b, показано, что в этом случае в форшоке возникают два типа волн: (1) альвеновские волны, распространяющиеся вдоль магнитного поля и имеющие круговую поляризацию и (2) линейно поляризованные волны, распространяющиеся под углом к магнитному полю. Важной особенностью, проявляющейся при доминирующей радиальной компоненте в межпланетном магнитном поле, является то, что эти два типа волн существуют в одной области пространства в одно и то же время. В результате их взаимодействия и нелинейности, приводящей к эволюции фронтов волн, образуются полости, в которых наблюдается пониженная на ~50% концентрация частиц, а также значительно меньшая по сравнению с окружающей средой напряженность магнитного поля. Образованные в результате укрупнения фронтов альвеновских и линейно поляризованных волн, полости в форшоке являются локальными пространственными структурами, окруженными слоями плазмы с повышенными концентрациями частиц и напряженностью поля. После формирования они дрейфуют вместе с потоком солнечного ветра по направлению к головной ударной волне планеты.

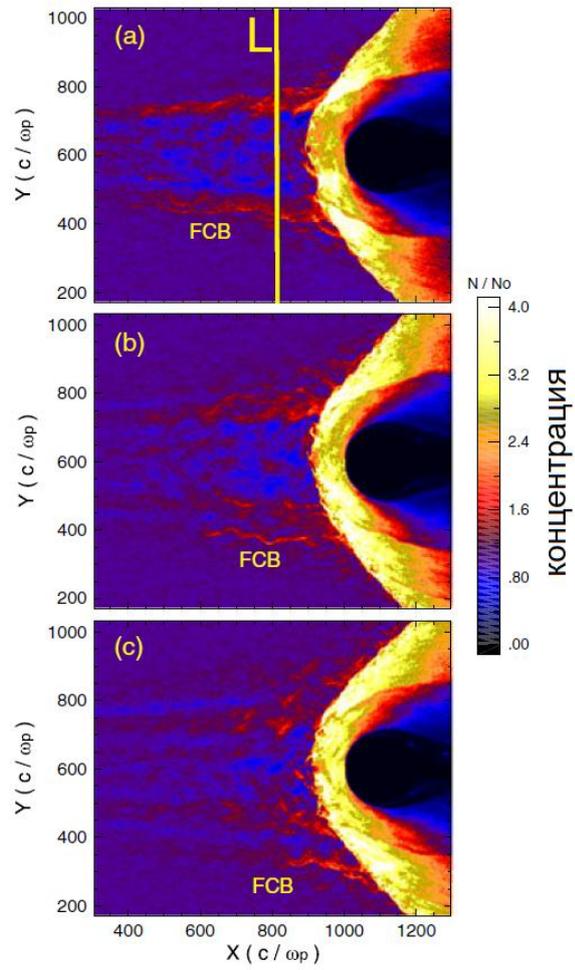


Рисунок 1.6. Результат гибридного моделирования (Omidí и др., 2013) формирования полости в форшоке у Земли, окружённой FCB. Цветом отмечена обезразмеренная концентрация частиц, на панелях (a), (b), (c) приведены разные времена эволюции образования.

Глава 2. Происхождение пучка ионов молодой аномалии горячего потока у Земли.

2.1 Введение

Целью работы, описанной в данной главе, является исследование характеристик и выявление источника происхождения пучка горячей плазмы, зарегистрированного спутниковой группировкой Cluster Европейского космического агентства 22 февраля 2006 года вблизи околоземной ударной волны.

Событие для анализа было выбрано из списка АГП, опубликованных в (Fascko et al, 2009). Интерес к изучению аномалии в данной работе обусловлен тем, что все 4 аппарата зарегистрировали событие на ранней стадии развития, когда момент пересечения ими токового слоя легко идентифицируется. Зарегистрированное явление имеет все признаки, присущие АГП (Schwartz и др., 2000): (1) горячая центральная область (рис. 2.2), (2) замедленная скорость солнечного ветра по сравнению с окружающей средой (рис. 2.2), (3) наличие областей сжатия с двух сторон от центральной области с увеличенной напряженностью магнитного поля (рис. 2.1), (4) наличие токового слоя, определяемого по наличию поворота вектора напряженности магнитного поля (см. раздел 2.3), (5) близость к ударной волне.

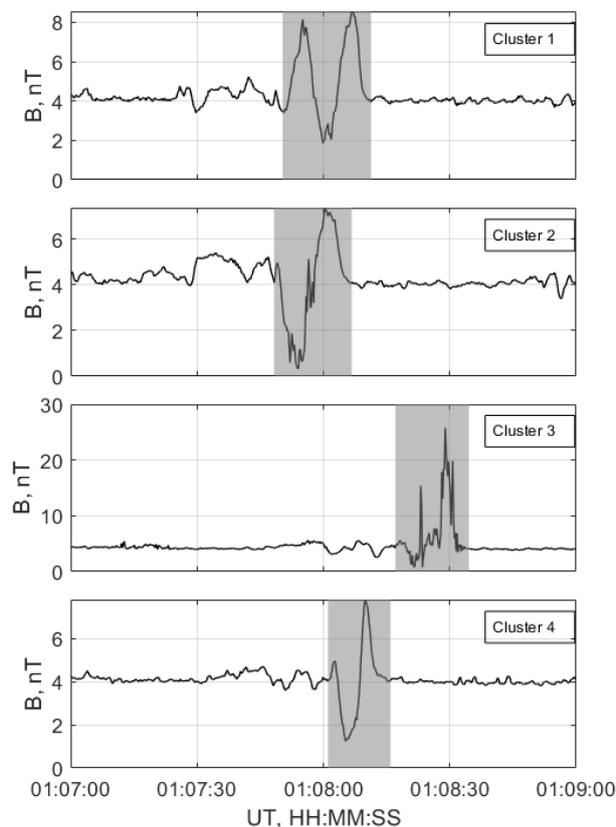


Рисунок 2.1. Временные профили модуля магнитного поля, измеренного на четырёх спутниках Cluster во время наблюдения АГП. Времена пересечения токового слоя каждым аппаратом выделены затенением.

Данное событие отмечено номером 3 в серии регистрации потоков частиц с энергиями до нескольких кэВ с направлениями распространения, отличными от потока солнечного ветра, наблюдаённых 22 февраля 2006 приблизительно в 01:08 UT (рис. 2.2).

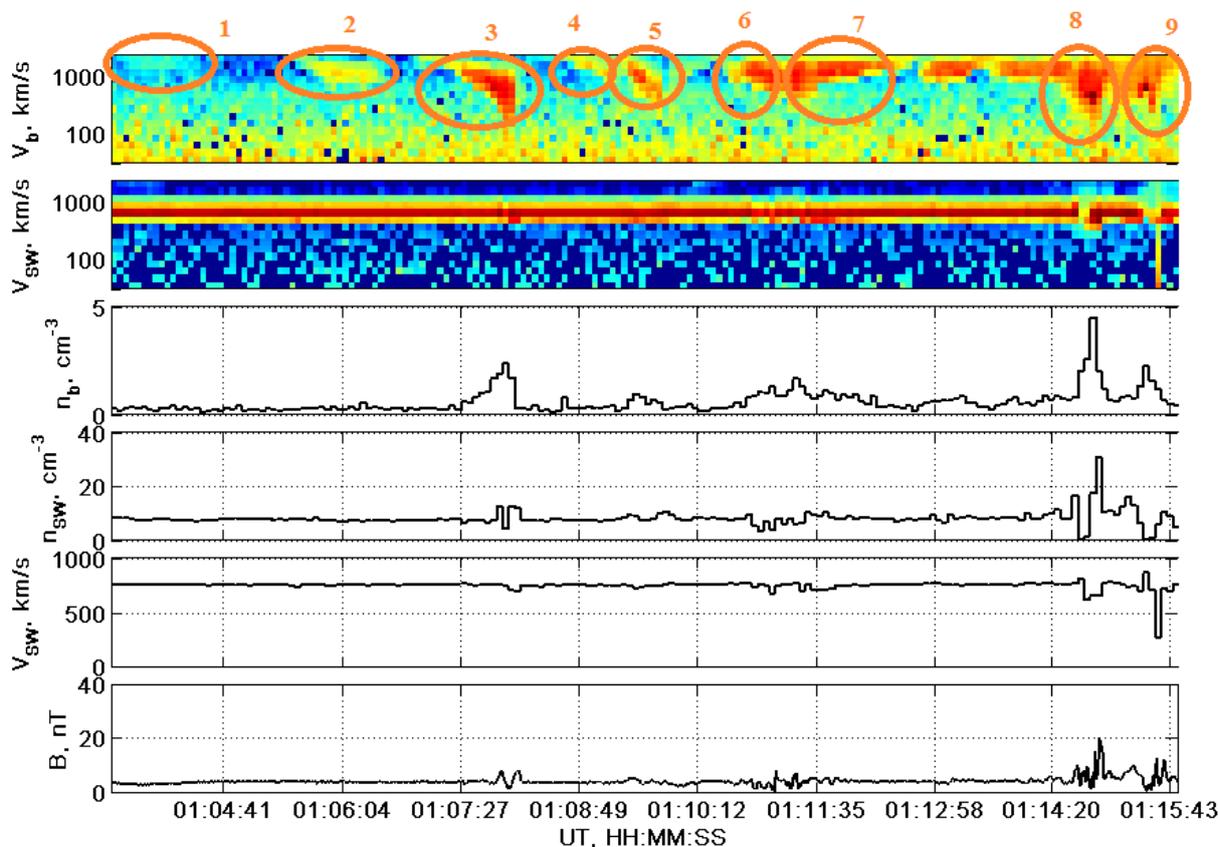


Рисунок 2.2. Данные с аппарата C1. Сверху вниз: временной спектр скоростей частиц отраженного пучка, временной спектр частиц солнечного ветра, концентрация частиц отраженного пучка, концентрация частиц солнечного ветра, скорость солнечного ветра, напряженность магнитного поля. Способ разделения популяций частиц описан в разделе 2.4.

2.2 Используемые данные

Работа, представленная в данной главе, основана на анализе данных спутниковой группировки Cluster. Миссия нацелена на изучение магнитосферы Земли и состоит из четырех идентичных аппаратов, летающих на эллиптической геоцентрической орбите, имеющих конфигурацию, близкую к тетраэдрической вблизи апоцентра орбиты. Далее в тексте аппараты имеют обозначения C1, ..., C4, соответственно. Спутники были выведены на околоземную орбиту в два запуска парами, 16 июля и 9 августа 2000 года, и функционируют до настоящего времени. Усреднённые параметры орбиты группировки таковы, что перигей составляет около 20 000 км, апогей – 111 000 км, наклонение – 135°, период обращения – 54 часа.

В работе были использованы данные магнитометров FGM и комплекса ионных спектрометров CIS. Комплекс приборов CIS на борту аппаратов Cluster обеспечивает

всенаправленное сканирование частиц в пространстве скоростей в 32 энергетических интервалах, 16 азимутальных и 8 полярных углах. Характеристики пучка солнечного ветра и отражённого пучка были проанализированы отдельно путём разделения пространства скоростей на две части, занятые частицами соответствующих популяций. Параметры плазмы были вычислены как моменты функции распределения, в которой фазовое пространство было задано в соответствии с сеткой (θ , ϕ , V), используемой в архиве данных Cluster (подробные описания процедур деления фазового пространства, а также вычисления моментов функции распределения приведены в разделе 2.4). Относительно высокое временное разрешение анализатора ионов CIS2/HIA на аппарате C1, составляющее 4 секунды, позволяет детально рассматривать поток частиц из АГП. Этот поток частиц также был зарегистрирован прибором CIS2/HIA на аппарате C3 с временным разрешением 12 секунд. Данные комплекса приборов CIS на аппарате C4 не используются из-за того, что для момента регистрации события доступны лишь данные измерений прибора CIS1/CODIF, не обеспечивающие достаточной чувствительности для данного исследования.

Положения спутников в моменты регистраций максимального значения магнитного поля при пересечении токового слоя (см. рис. 2.1) в системе координат GSE (ось X направлена на Солнце, Y – против скорости орбитального движения планеты, Z дополняет систему до правой тройки) представлены в таблице 2.1. Среднее расстояние между аппаратами составляет порядка $1 R_E$, где R_E – радиус Земли. В последней строчке приведена разность времен регистрации токового слоя космическими аппаратами, отсчитанная от момента регистрации события спутником 4. Моментом регистрации токового слоя считалось пересечение области с максимальной напряженностью магнитного поля.

Таблица 2.1. Координаты спутников в момент регистрации события и время задержки в регистрации между аппаратами.

Расстояние, R_E	Аппарат			
	C1	C2	C3	C4
X_{GSE}	10.695	10.716	9.854	10.944
Y_{GSE}	- 2.407	- 2.211	- 3.030	- 2.707
Z_{GSE}	-11.059	-10.827	-11.908	-11.897
Задержка, с	-3.0	-9.4	19.0	0

2.3 Наблюдения

Скорость V_{sw} и концентрация n_{sw} солнечного ветра, вычисленные отдельно для популяции частиц солнечного ветра, принимают значения $V_{sw} \sim 750$ км/с и $n_{sw} \sim 7.5$ см⁻³. Значения напряженности межпланетного магнитного поля по каждую из сторон от токового слоя \vec{B}_1 и \vec{B}_2 были получены путем усреднения напряженности поля по временному интервалу, в течение которого поле было стабильно. Величины этих интервалов составляют ~ 30 сек. Для аппарата С1 значение \vec{B}_1 составляет 4.13 (2.05; -3.31; 1.38) нТл, значение \vec{B}_2 составляет 3.94 (2.16; -2.80; 1.74) нТ. Углы поворота вектора напряженности магнитного поля на токовом слое составляют: 14.5° (С1), 4.0° (С2), 9.0° (С3) и 11.4° (С4). Несмотря на малый угол поворота магнитного поля, зарегистрированный всеми спутниками, нормали к токовому слою, рассчитанные ниже, имеют схожую ориентацию для трёх из них, что дает основание считать данную структуру тангенциальным разрывом.

Нормаль к токовому слою была вычислена для каждого аппарата в предположении того, что нормальная компонента к разрыву нулевая:

$$\vec{n} = \frac{\vec{B}_1 \times \vec{B}_2}{|\vec{B}_1| |\vec{B}_2|} \quad (2.1)$$

Компоненты этих нормалей перечислены в таблице 2.2. На рис. 2.1 видно, что профиль напряженности магнитного поля, зарегистрированный аппаратом С3 при пересечении токового слоя, имеет более возмущенный характер относительно профилей, зарегистрированных другими аппаратами. Также, вектор нормали к разрыву, вычисленный по измерениям магнитного поля на спутнике С3, существенно отличается от рассчитанных нормалей по данным остальных спутников, поэтому при вычислении направления вектора нормали к токовому слою использовались данные, усреднённые по аппаратам С1, С2, С4.

Ориентация токового слоя также была вычислена методом тайминга (см., например, Harvey, 1998), в котором для вычисления нормали \vec{n} и скорости распространения разрыва \vec{V} используется время задержки t_{ij} между регистрацией разрыва аппаратами i и j . Принимая поверхность разрыва идеально плоской, скорость его распространения сонаправленной с нормалью и много превышающей скорость орбитального движения аппаратов, можно записать

$$(\vec{R}_{ij}; \vec{n}) = V t_{ij} \quad (2.2)$$

где \vec{R}_{ij} - расстояние между аппаратами i и j (см. рис. 2.3). Данное уравнение может быть переписано в виде

$$\|D\| \frac{\vec{n}}{V} = t_{i4} \quad (2.3),$$

где введено обозначение

$$\|D\| = \begin{vmatrix} R_{14}^x & R_{i4}^y & R_{i4}^z \\ R_{24}^x & R_{24}^y & R_{24}^z \\ R_{34}^x & R_{34}^y & R_{34}^z \end{vmatrix}$$

Данная система линейных уравнений может быть разрешена относительно \vec{n} :

$$\frac{\vec{n}}{V} = \|D\|^{-1} \begin{vmatrix} t_{14} \\ t_{24} \\ t_{34} \end{vmatrix} \quad (2.4)$$

Нормаль $\vec{n} = \frac{\vec{v}}{V}$ к токовому слою, вычисленная методом тайминга, приведена в последней строчке таблицы 2.2.

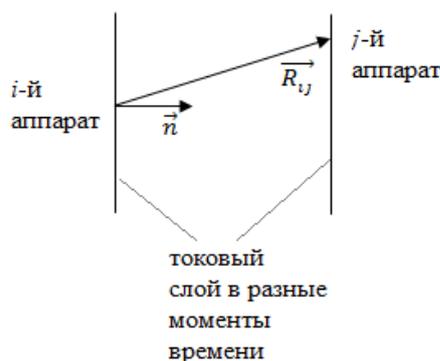


Рисунок 2.3. Геометрия метода тайминга. Предполагается, что токовый слой идеально плоский и распространяется вдоль вектора нормали.

Таблица 2.2. Нормали к токовому слою, вычисленные по магнитному полю для каждого из 4 аппаратов в том приближении, что токовый слой является тангенциальным разрывом, а также нормаль, вычисленная по методу тайминга. Знак нормали был выбран таким образом, чтобы она была направлена в полусферу, ориентированную на Солнце.

	n_x	n_y	n_z
C1	0.726	0.209	-0.656
C2	0.823	0.417	-0.384
C3	0.209	-0.414	-0.886

C4	0.858	0.476	-0.196
Среднее по C1, C2, C4	0.824	0.377	-0.423
Метод тайминга	0.083	0.966	-0.246

На рисунке 2.4 проиллюстрировано взаимное расположение аппаратов Cluster в момент регистрации анализируемого события, вектора нормалей к токовому слою по данным напряженности магнитного поля для каждого аппарата, нормаль к ударной волне магнитосферы Земли, вычисленная по модели (Formisano и др., 1979), а также ориентации токового слоя по магнитному полю (синяя плоскость, данные усреднены по аппаратам C1, C2, C4) и по методу тайминга (красная плоскость). Видно, что нормали к токовому слою, вычисленные двумя способами, очень сильно отличаются друг от друга. Так, угол между нормалью, вычисленной по магнитному полю и солнечным направлением составляет $\theta_{X-CS} \sim 34.5^\circ$, а тот же угол для нормали, посчитанной по методу тайминга, составляет $\theta_{X-CS} \sim 85.2^\circ$.

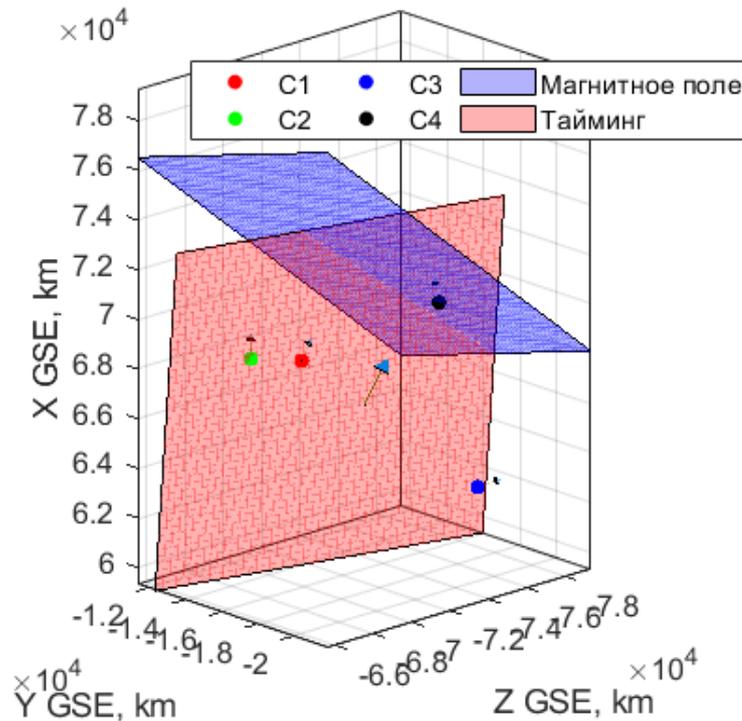


Рисунок 2.4. Взаимное расположение аппаратов Cluster. Стрелки у каждого аппарата указывают направление нормали к токовому слою, вычисленное по повороту вектора магнитного поля. Большая стрелка в середине рисунка иллюстрирует направление нормали к ударной волне магнитосферы Земли, рассчитанной по модели (Formisano et al., 1979). Цветные плоскости - ориентации токового слоя, рассчитанные разными методами.

Данное расхождение может быть объяснено тем, что форма разрыва в данном случае не может быть приближена плоскостью, и в плазме присутствуют сильные возмущения в

окрестности спутника С3. Наиболее достоверной из приведенных оценок ориентации разрыва в таком случае можно считать нормаль, вычисленную по данным магнитного поля, усредненную по аппаратам С1, С2, С4.

Для определения места нахождения ударной волны в момент регистрации события и вычисления угла между нормалью к ударной волне и вектором напряженности магнитного поля θ_{bn} было использовано предположение, что размер магнитосферы Земли пропорционален $(\rho V^2)^{-6}$, где ρ – плотность частиц солнечного ветра, V – его скорость. Давление ρV^2 солнечного ветра в момент наблюдения события было примерно в 4.4 раза выше среднего значения, что позволяет заключить, что фронт ударной волны находился примерно в 1.32 раза ближе к Земле, чем его среднее положение. Однако, при таком положении ударной волны силовые линии магнитного поля, продленные от точки нахождения группировки Cluster, её не пересекают, что затрудняет вычисление параметра θ_{bn} . Для выполнения условия пересечения масштабирующий фактор должен быть <1.29 для \vec{B}_2 и <1.24 для \vec{B}_1 и \vec{B}_2 . Поэтому, для определения угла θ_{bn} поверхность фронта ударной волны была отмасштабирована с таким коэффициентом подобия, чтобы точка нахождения спутниковой группировки принадлежала этой поверхности; в этой же точке была вычислена нормаль к ударной волне. Полученные значения θ_{bn1} и θ_{bn2} для магнитных полей с обеих сторон от токового слоя, приведенные в таблице 2.3, свидетельствуют о том, что событие зарегистрировано вблизи квази-перпендикулярной ударной волны.

Таблица 2.3. Координаты нормали к ударной волне, векторов магнитных полей с обеих сторон от токового слоя, углы между силовыми линиями магнитного поля и нормалью к ударной волне.

N_{bs}	(0.872; - 0.210; - 0.441)
B_1	(2.05; - 3.32; 1.38) нТ
B_1 (нормированный)	(0.495; - 0.802; 0.335)
B_2	(2.16; - 2.80; 1.74) нТ
B_2 (нормированный)	(0.548; - 0.711; 0.441)
θ_{bn1}	65.5°
θ_{bn2}	67.0°

2.4 Анализ

Для анализа встречного пучка пространство скоростей было разделено на два угловых сектора, соответствующих направлению движения солнечного ветра и направлению движения ионов из АГП. На рисунке 2.5 представлено поле зрения прибора в сферической системе

координат (по горизонтали отложен азимутальный угол ϕ , по вертикали – широтный угол θ ; таким образом, направление оси $+X_{GSE}$ соответствует центру рисунка), где в левой части приведены регистрируемые потоки протонов в 4 энергетических и 3 временных интервалах, а справа – правило разделения пространства скоростей на угловые сектора, занимаемые разными популяциями частиц. Область пространства скоростей, занимаемая солнечным ветром, легко выделяется, так как поток солнечного ветра имеет сравнительно малый угловой размер с резкими границами (область пространства скоростей, занимающая азимутальные углы 135° до 180° и широтные углы от -45° до $+45^\circ$ и выделенная затенением в правой части рис. 2.5). Стоит отметить, что угловой сектор, отождествленный как занимаемый частицами солнечного ветра, намного превышает угловой размер невозмущенного потока солнечного ветра (составляющий единицы градусов в каждом из направлений), так как в данном случае регистрируется солнечный ветер, термализованный при прохождении АГП. Оставшаяся часть пространства скоростей отождествлена как область, занимаемая частицами АГП. Скорости, температуры и концентрации двух популяций частиц были вычислены как моменты соответствующих частей функции распределения. Формулы, по которым производился расчёт, приведены в приложении 1.

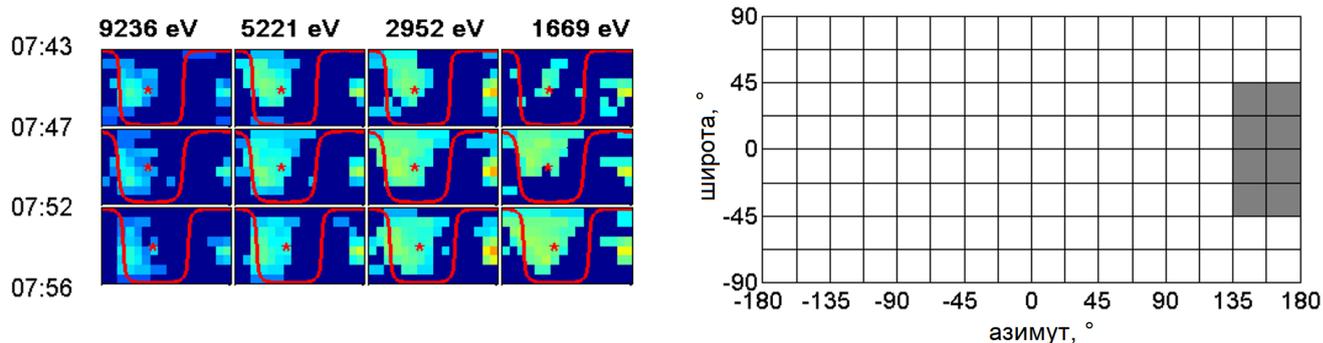


Рисунок 2.5. Разделение пространства скоростей на две части. Слева: энерго-угловые распределения потоков частиц вблизи АГП: энергия отмечена сверху, время (мм:сс) слева. Красные линии показывают магнитный экватор (плоскость, перпендикулярную направлению вектора магнитного поля), «» – направление вектора напряженности магнитного поля. Яркое пятно в правой части каждого распределения – солнечный ветер. Широкое пятно в левой части изображения – отраженный пучок. Справа: стека в сферической системе координат, в которой проводятся измерения плазмы. Угловой сектор, отождествленный как солнечный ветер, выделен затенением.*

Событие, отмеченное под номером 3 на рисунке 2.2, представлено на рисунке 2.6 в больших подробностях. Встречный солнечному ветру пучок наблюдался лишь в промежуток времени до пересечения токового слоя. Видна зависимость энергии частиц от времени

регистрации (и, соответственно, расстояния до разрыва), а также возрастающая со временем температура. Первыми регистрировались частицы высоких энергий, по мере приближения аппарата к токовому слою, наблюдаются всё менее энергичные частицы.

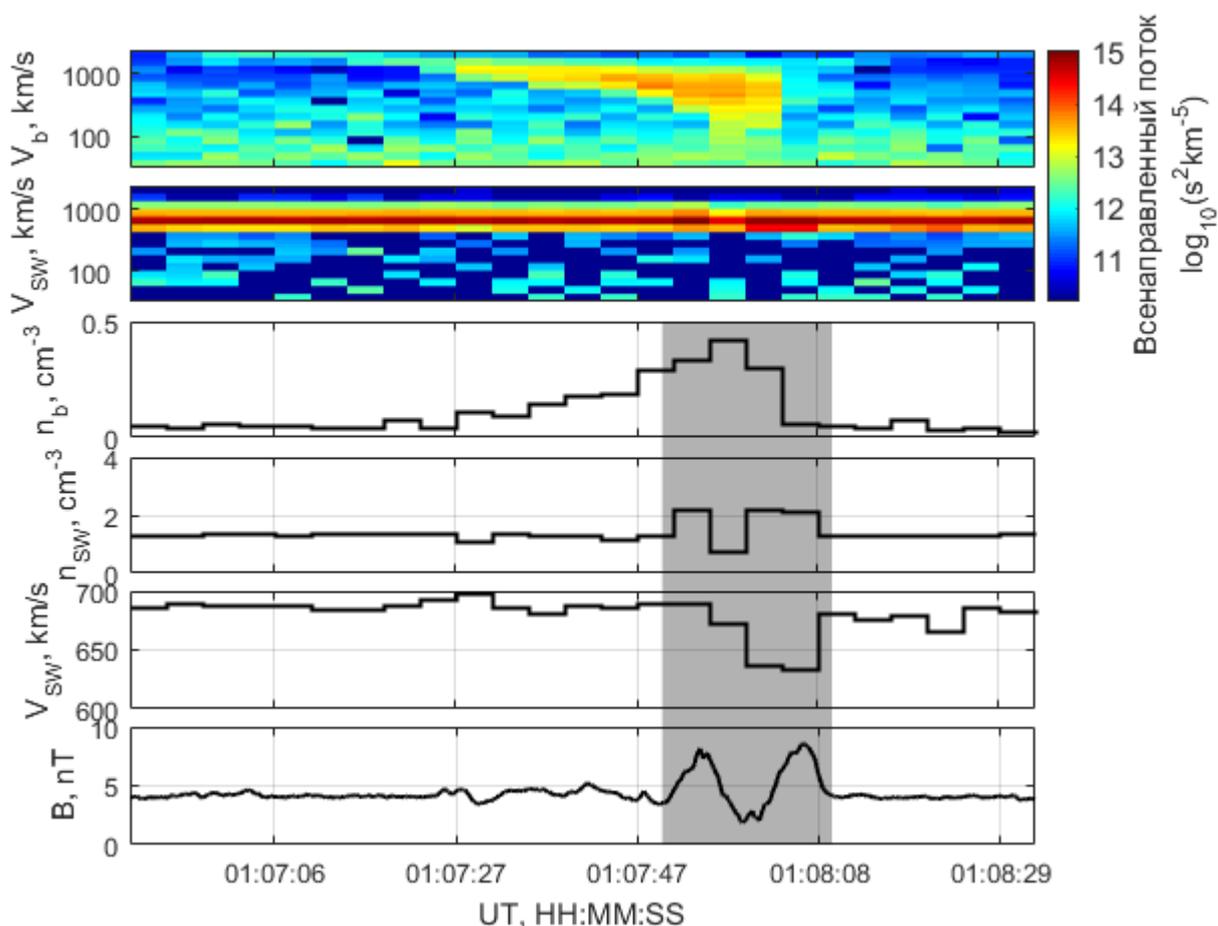


Рисунок 2.6. Событие 3, зарегистрированное аппаратом С1. Сверху вниз: временной спектр скоростей частиц отраженного пучка, временной спектр частиц солнечного ветра, концентрация частиц отраженного пучка, концентрация частиц солнечного ветра, скорость солнечного ветра, напряженность магнитного поля. Момент пересечения токового слоя выделен затенением. Временное разрешение плазменных данных составляет 4с.

Можно выделить следующие характеристики отражённого пучка: (1) он наблюдается лишь с одной стороны от токового слоя, (2) его регистрация происходит непрерывно вплоть до момента пересечения токового слоя, (3) по мере приближения к токовому слою, его средняя скорость уменьшается, ширина спектра по энергии и концентрация частиц увеличиваются, (4) концентрация частиц пучка в момент перед пересечением с токовым слоем составляет примерно 25% от концентрации частиц солнечного ветра, (5) концентрация частиц пучка в момент пересечения токового слоя максимальна и составляет ~28% от концентрации частиц солнечного ветра, (6) скорость солнечного ветра в токовом слое уменьшается примерно на 50

км/с. Все эти признаки демонстрируют сходство наблюдаемого образования с АГП, однако интерес представляет структура отраженного пучка, демонстрирующая зависимость энергии от времени наблюдения, которая ранее подробно не рассматривалась.

Рисунок 2.7 демонстрирует две серии спектров по скоростям, зарегистрированные аппаратами С1 и С3. Временное разрешение плазменных данных на аппарате С3 меньше, чем на аппарате С1, в 3 раза. Наблюдается сходство в изменении характеристик спектров со временем, но есть различия в угловых распределениях регистрируемых частиц.

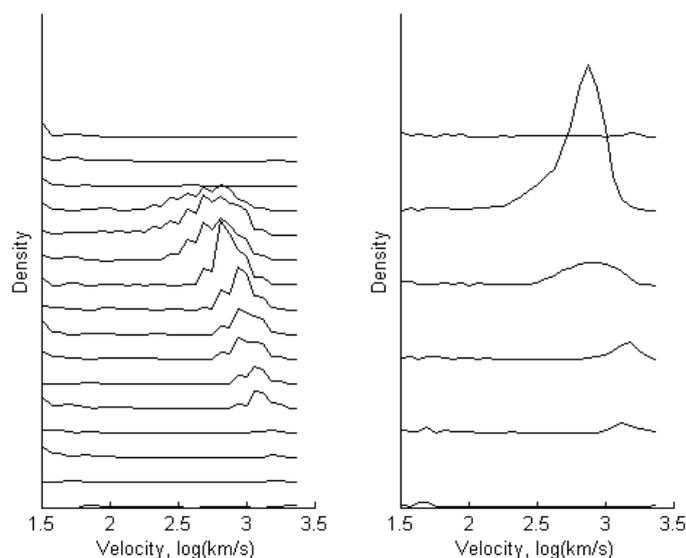


Рисунок 2.7. Слева: последовательность спектров ионов по скоростям, зарегистрированная аппаратом С1. Справа: то же самое для аппарата С3. Время направлено снизу вверх. Расположение спектров по вертикали выбрано таким образом, чтобы обе картинки удовлетворяли одной временной шкале.

Эволюция функции распределения ионов по скоростям, измеренная на спутнике С1, проиллюстрирована на рисунке 2.8. Каждый прямоугольник соответствует распределению протонов по направлению скорости в равнопромежуточной проекции (картографическая проекция, в которой параллели перпендикулярны меридианам и отстоят друг от друга на одном расстоянии) для частиц соответствующих энергий, указанных сверху (структура обозначения на распределениях те же, что и на рис. 2.5). В левой части рисунка 2.8 находятся графики напряженности магнитного поля, концентраций частиц отраженного пучка и солнечного ветра от времени, текущего сверху вниз. Таким образом, каждая строчка рисунка является представлением функции распределения частиц, накопленных в пределах временного интервала, границы которого указаны слева, по скоростям. Солнечный ветер наблюдается на энергиях от ~ 1700 эВ до ~ 5000 эВ в правой центральной части каждого прямоугольника в

течение всего временного интервала, охватываемого рисунком. Пучок частиц АГП, встречный солнечному ветру, появляется в левой части пич-фазовых функций распределения и имеет значительно больший разброс по энергиям – от ~ 300 эВ до ~ 29 кэВ (и, возможно, еще выше, но прибор не может их регистрировать) и большой угловой размер. Со временем его угловой размер и ширина по энергии увеличиваются, так что ко времени пересечения аппаратом токового слоя пучок занимает практически всю левую полусферу функции распределения.

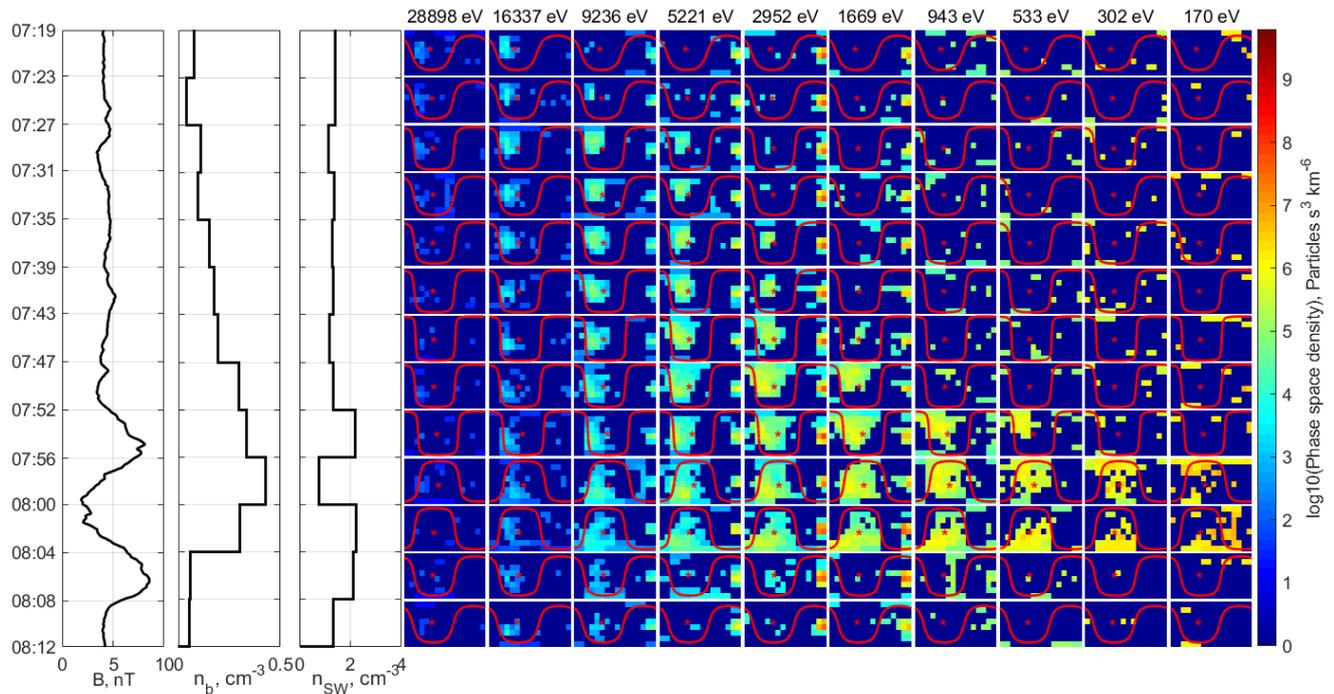


Рисунок 2.8. Эволюция функции распределения частиц во времени по данным аппарата С1.

Сверху вниз отложено время, слева направо – энергия. Каждая прямоугольная панель – распределение скоростей частиц по двум углам в равнопромежуточной проекции (то же, что и на рис. 2.5). Слева представлены графики напряженности магнитного поля, а также концентраций частиц отраженного пучка и солнечного ветра от времени. Временное разрешение измерений ионов составляет 4с.

В конечном счёте, пучок становится настолько широко распределен по направлению скорости, что часть его популяции становится почти сонаправленной со скоростью солнечного ветра внутри токового слоя, что хорошо видно на энергии 1669 эВ между 08:00 и 08:04 UT.

Похожее поведение наблюдается и на данных со спутника С3, представленных на рисунке 2.9. Можно видеть, что «перемешивание» отраженного пучка с солнечным ветром имеет более явный характер, что проявляется в наличии более широкого «моста» между пучками внутри токового слоя. По-видимому, это связано с тем, что аппарат С3 находится ближе к ударной волне на ~ 5300 км.

На рисунке 2.10 проиллюстрирована эволюция питч-угловых распределений во времени отдельно для каждой энергии по мере того, как С1 приближается к токовому слою. Сперва появляются частицы высоких энергий, затем менее энергичные частицы. Видно, что ионы каждой отдельной энергии сначала видны на малых питч-углах, затем на больших.

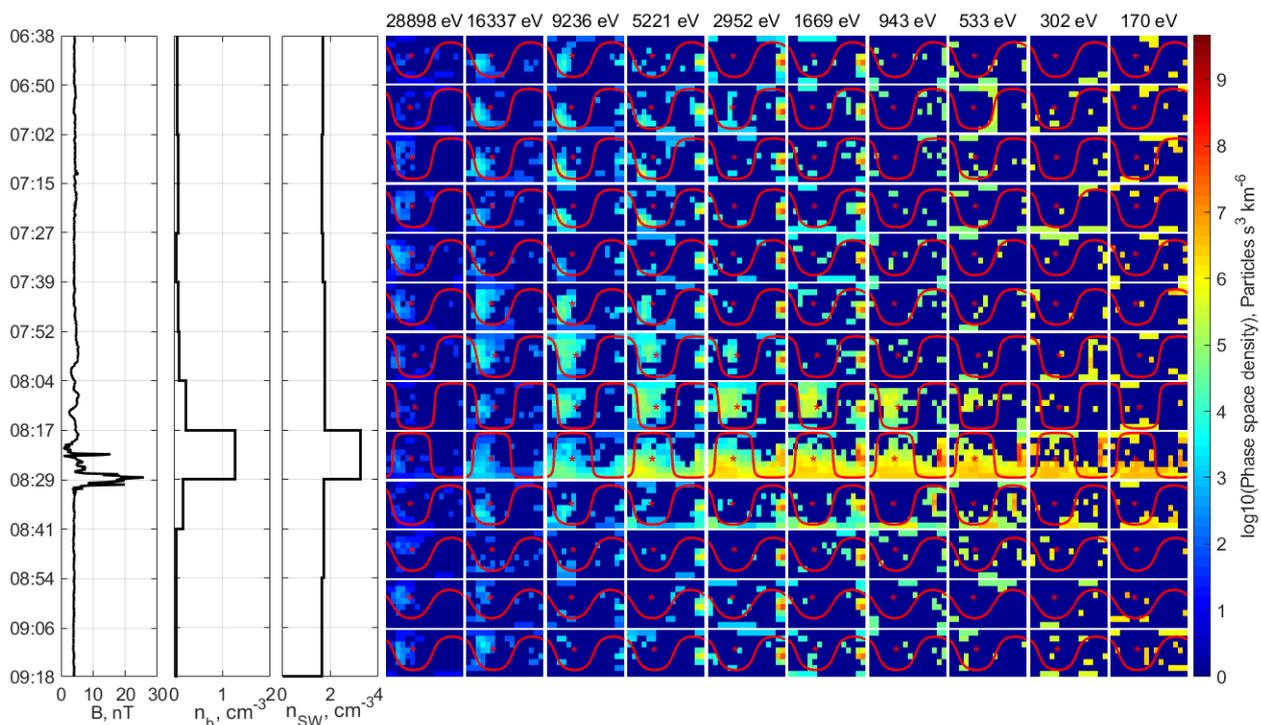


Рисунок 2.9. То же, что и рис. 2.8, для данных аппарата С3. Временное разрешение ионных данных составляет 12с.

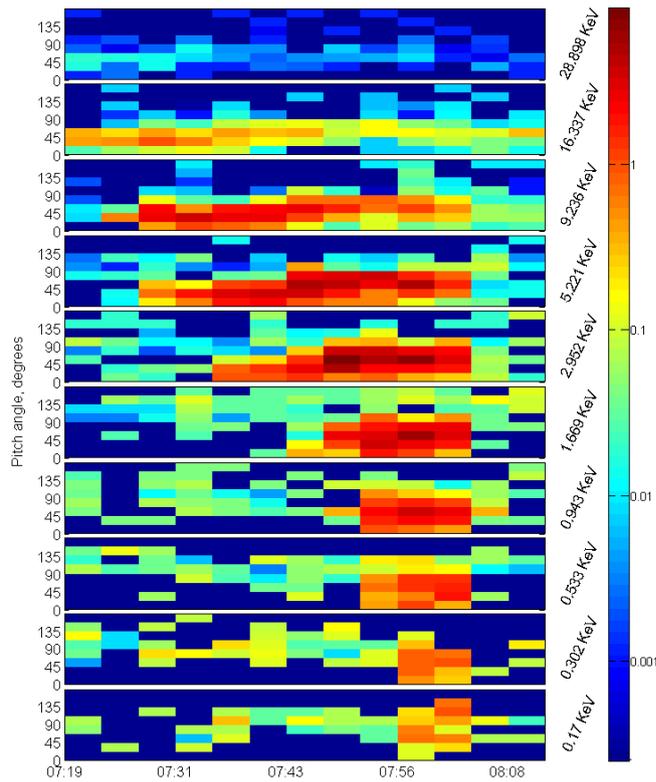


Рисунок 2.10. Эволюция питч-угловых распределений во времени для каждой отдельной энергии, указанной справа. Цветная шкала определяет величину потока частиц. Примечательно появление частиц низких энергий позже по времени.

Рост питч-углов ионов в каждом канале измерения энергии с момента их первой регистрации вплоть до пересечения с токовым слоем допускает возможность, что скорость этого роста схожа для частиц всех энергий (кроме каналов с самыми низкими из приведенных энергий, соответствующих 0.3 кэВ и 0.17 кэВ). Для сравнения динамики изменения питч-углов разных энергий была проведена операция «растяжения» временной оси каждой отдельной энергии в количество раз, пропорциональное гирорадиусу ρ частиц этой энергии. Результат проведения такой операции продемонстрирован на рисунке 2.11. Коэффициент растяжения временной оси каждой энергии составляет $t_n = \rho_1/\rho_n$, где ρ_1 – гирорадиус частиц с самыми низкими энергиями, регистрируемыми комплексом (~28.9 эВ), а ρ_n – гирорадиус частиц с энергией, для которой проводилось масштабирование. Энергии менее 1.7 кэВ выброшены из рассмотрения, так как они наблюдались лишь на двух или трех временных интервалах и не могут составить надёжный тренд. Данный график предполагает наличие схожей картины вариаций питч-углов частиц разной энергии, принадлежащих рассматриваемому пучку.

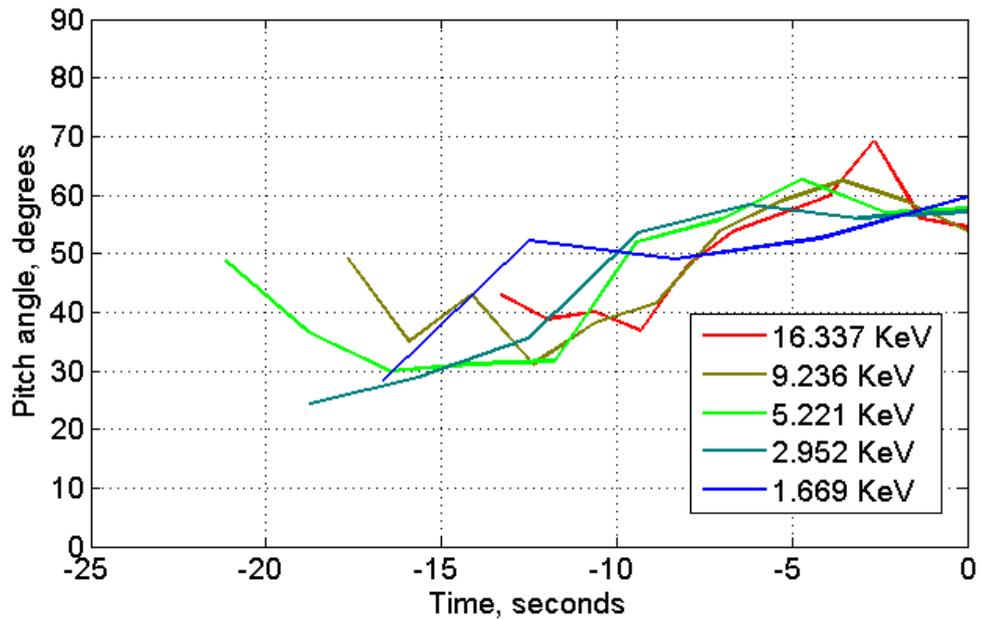


Рисунок 2.11. Изменение питч-углов частиц для соответствующих энергий. Нулевой момент времени соответствует пересечению аппаратом токового слоя. Масштаб времен нормирован по гирорадиусу для каждой энергии (см. текст).

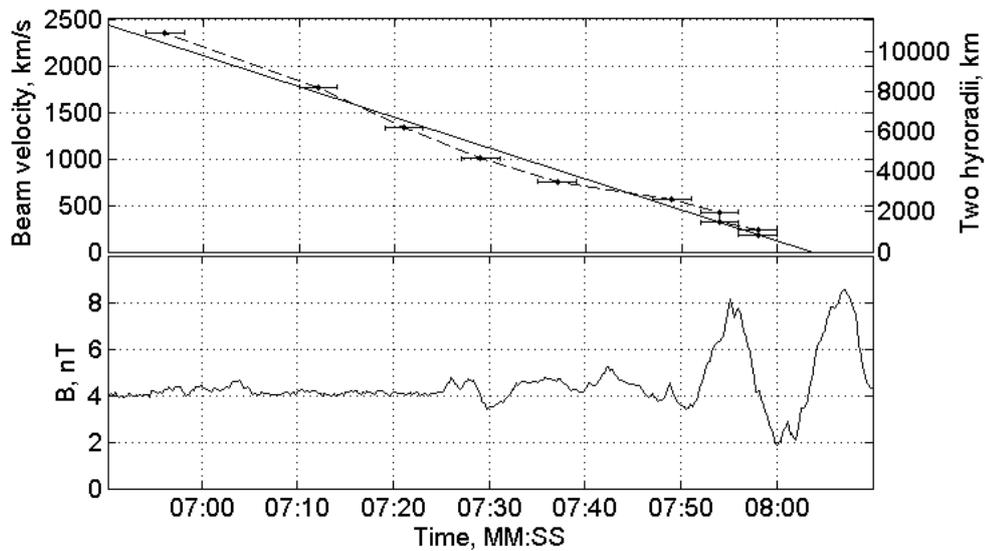


Рисунок 2.12. Сверху: зависимость скорости частиц от момента времени их первой регистрации по данным С1. Горизонтальные планки погрешностей соответствуют временному разрешению плазменных данных. Шкала скоростей также переведена в шкалу гирорадиусов протонов при напряженности магнитного поля в 4 нТ. Снизу: профиль напряженности магнитного поля.

На рисунке 2.12 изображена зависимость скоростей частиц от момента времени, в котором частицы с данной скоростью были впервые зарегистрированы. Линейная

аппроксимация данной последовательности методом наименьших квадратов показывает, что расстояние между местом первой регистрации частиц и токовым слоем с хорошей точностью пропорционально гирорадиусу частиц. Скорость приближения токового слоя к космическому аппарату может быть оценена как $V_{sw} \cdot \cos(\theta_{X-CS}) \sim 600$ км/с. Таким образом, за время, приведённое на рис. 2.12, токовый слой приблизился к группировке на расстояние $\sim 18\,000$ км. Это может свидетельствовать о том, что источником частиц пучка, примыкающего к токовому слою, является сам токовый слой, и ионы удаляются от него на расстояние, не превышающее двух гирорадиусов.

Возможное свидетельство происхождения пучка может быть заключено в его энергетическом спектре. На рисунке 2.13 показаны три энергетических спектра: спектр, проинтегрированный по времени от начала регистрации пучка вплоть до пересечения токового слоя (зелёный), спектр, зарегистрированный в момент пересечения токового слоя (красный), а также спектр ионов, зарегистрированный в магнитослое после пересечения аппаратом С1 ударной волны, которое произошло через 1 ч 10 мин после исследуемого события (синий). Также на рисунке представлены аппроксимации каждого спектра распределением Максвелла. Наблюдается значительное сходство между тремя профилями. Моменты соответствующих функций распределения показаны в таблице 2.4.

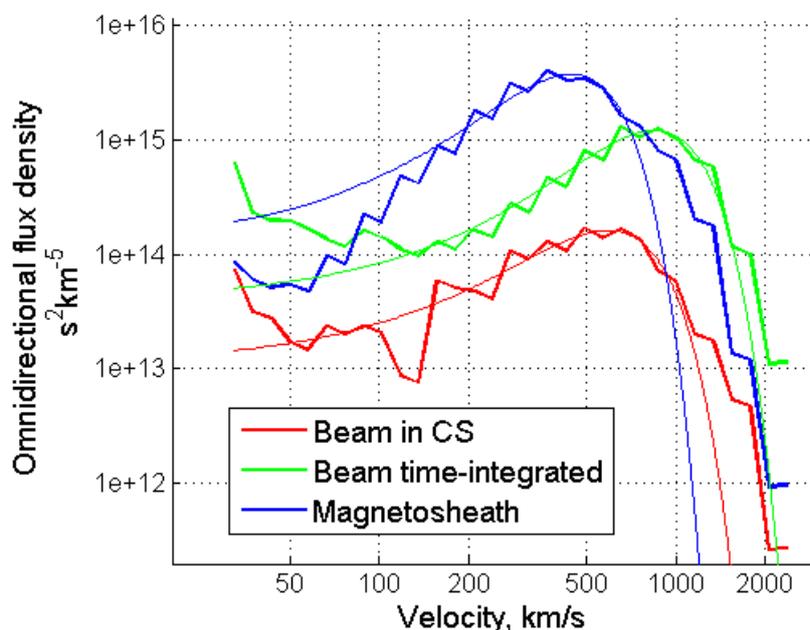


Рисунок 2.13. Сравнение энергетических спектров частиц внутри токового слоя (красный), интегральной суммы частиц пучка по временному интервалу от начала его регистрации до пересечения аппаратом токового слоя (зелёный) и частиц из магнитослоя (синий). Тонкие линии – аппроксимации профилей распределением Максвелла.

Таблица 2.4. Моменты функций распределений частиц, спектры которых представлены на рисунке 2.13.

	Проинтегрированный пучок перед токовым слоем	Пучок в токовом слое	Магнитослой
$n, \text{см}^{-3}$	10,7	2.1	35
$\langle v_{\parallel} \rangle, \text{км/с}$	355.1	226.9	71.7
$\langle v_{\perp} \rangle, \text{км/с}$	423.8	344.8	279.6
$\langle v_{total} \rangle, \text{км/с}$	552.9	412.8	288.6
$T_{\parallel}, \text{эВ}$	600.0	291	209.3
$T_{\perp}, \text{эВ}$	595.0	350	

Распределения магнитных ($P_{mag} = \frac{B^2}{8\pi}$) и плазменных ($P = nkT$) давлений в окрестности токового слоя проиллюстрированы на рисунке 2.14. Видно доминирование параллельного и перпендикулярного ионных давлений, которые достигают своего максимума внутри токового слоя.

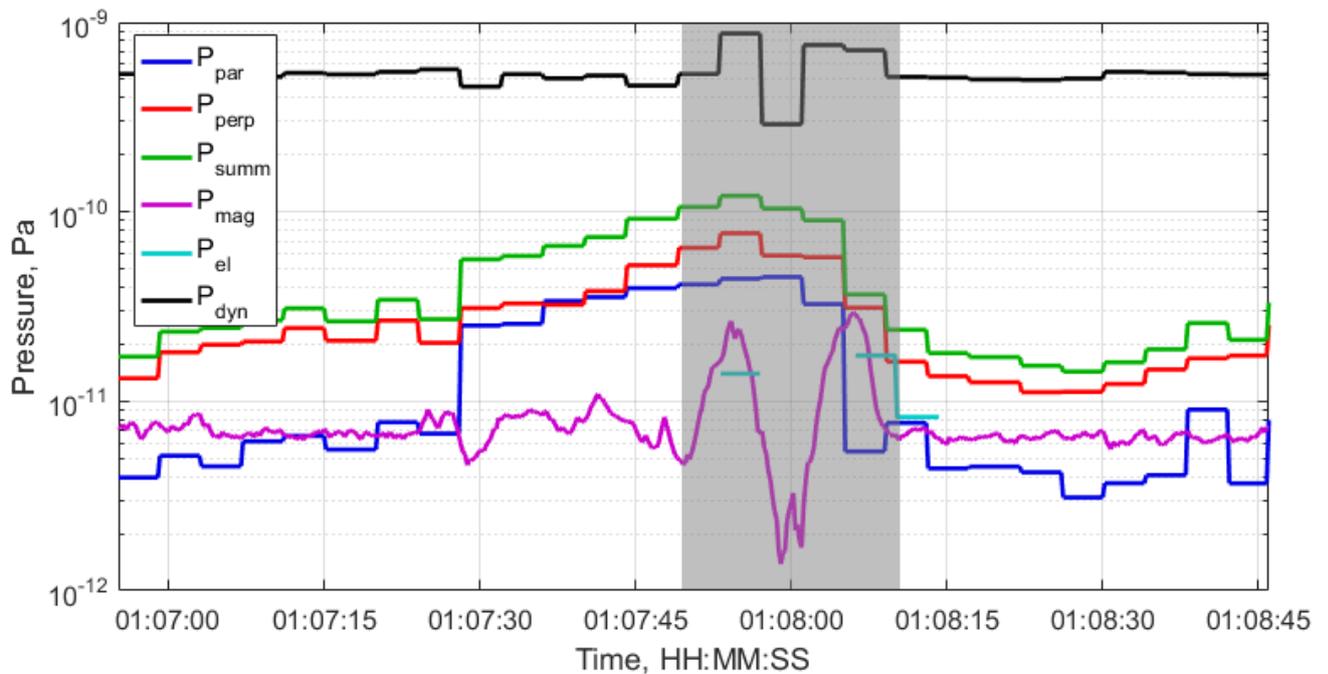


Рисунок 2.14. Динамическое давление солнечного ветра, магнитное давление (фиолетовый), ионное параллельное давление (тёмно-синий), ионное перпендикулярное давление (красный),

полное ионное давление (зелёный), электронное давление (бирюзовый, данные имеются только для 3 временных интервалов). Момент пересечения токового слоя затенён серым.

Таким образом, в результате анализа отраженного пучка ионов были обнаружены его следующие свойства:

- встречный солнечному ветру пучок наблюдается лишь с одной стороны от токового слоя
- пучок диспергирован по скоростям: сначала появляются частицы высоких энергий, затем, по мере приближения аппарата к токовому слою, наблюдаются всё менее энергичные частицы
- ширина энергетического спектра пучка увеличивается по мере приближения аппарата к токовому слою
- расстояние между токовым слоем и местом, где впервые были зарегистрированы частицы определенной энергии пропорционально гирорадиусу этих частиц
- встречный пучок наблюдался непрерывно вплоть до пересечения аппаратом токового слоя
- частицы самых низких энергий (0.17 кэВ и 0.3 кэВ) наблюдались непосредственно внутри токового слоя
- концентрация частиц пучка возрастает по направлению к токовому слою и достигает максимума внутри него (рис. 2.6, 2.8)
- концентрация частиц встречного пучка составляет приблизительно 25-28% от концентрации частиц невозмущенного солнечного ветра по данным спутника С1; подобную оценку невозможно провести по данным аппарата С3, который находился ближе к ударной волне, из-за перемешивания частиц пучка и солнечного ветра, что затрудняет разделение фазового пространства на части, занимаемые частицами определенного происхождения
- ионное тепловое давление достигает максимума внутри токового слоя
- диссипация энергии пучка, проявляемая в виде взаимодействия между ним и солнечным ветром, была большей в месте нахождения спутника С3, который был ближе к ударной волне, чем аппарат С1
- энергетические спектры частиц, наблюдаемые перед пересечением аппаратом токового слоя и внутри него, были весьма схожи со спектром частиц в магнитослое за ударной волной, зарегистрированным через 70 минут после исследуемого события

2.5 Обсуждение результатов

Пучок, исследуемый в данной работе, схож с пучком из (Tjulin et al., 2009): он надтепловой, диспергированный и смежный с аномалией горячего потока. Однако для описания поведения пучка от 22 февраля 2006 года было решено не использовать модель (Tjulin et al., 2009), так как требовалось учитывать скорость движения тангенциального разрыва. Также, сравнимые размеры области, занимаемой отраженным пучком и толщиной аномалии, требуют учёта структуры токового слоя при расчёте движения частиц.

Наиболее интересные свойства пучка выявлены в результате двухступенчатого анализа: сначала выявлена связь между геометрией распространения ионов и ориентацией токового слоя, затем были проанализированы концентрации и энергетические характеристики пучка.

Свойства геометрии:

- Диспергированный пучок наблюдался вплоть до пересечения аппаратом токового слоя
- Ионы наименьших энергий наблюдаются только внутри токового слоя
- Зависимость между временем первого наблюдения частиц с определенной скоростью и этой скоростью имеет линейный характер
- Изменение питч-углового распределения частиц во времени, нормированное по гирорадиусу, сходно для частиц разных энергий
- Магнитное давление и концентрация частиц солнечного ветра меньше в центральной части токового слоя, чем в его окрестностях

Характеристики моментов функции распределения:

- Концентрация частиц пучка возрастает в направлении токового слоя
- Наибольшая концентрация частиц пучка достигается внутри токового слоя
- Давление плазмы внутри токового слоя выше, чем вне его
- Энергетический спектр частиц пучка схож со спектром частиц из магнитослоя, но первый несколько более разогрет, чем второй

Важным обстоятельством является то, что все эти свойства наблюдаются на обоих аппаратах, разделенных большими расстояниями. Это подразумевает, что пучок, исследуемый в данной работе, не является локальным явлением; его квази-стационарная структура имеет связь с токовым слоем. В пользу этого свидетельствует то, что аппарат СЗ, находящийся значительно ближе к ударной волне, чем С1, зарегистрировал пучок с очень похожими характеристиками позже по времени, без каких-либо следов дальнейшей эволюции структуры. Учитывая, что среднее расстояние от аппаратов до ударной волны составляло $\sim 5\ 300$ км, а гирорадиусы частиц лежат в диапазоне 1 000 - 5 000 км, различия, вызванные нестационарностью структуры, должны быть наблюдаемыми.

Сравнение ионных температур внутри пучка и токового слоя с температурой в магнитослое позволяет предположить, что плазма магнитослоя может быть источником пучка. Ионная температура встречного солнечному ветру пучка в токовом слое примерно в 1.5 раза выше температуры в магнитослое, а температура этого же пучка в области, прилегающей к токовому слою, примерно в 2.5 раза выше этой температуры. Такое последовательное увеличение энергии плазменного образования может быть результатом диссипации энергии в процессе развития двухпучковой неустойчивости при взаимодействии с солнечным ветром.

Выявленные свойства отраженного пучка предполагают, что причиной его появления может быть область с малой напряженностью магнитного поля, находящаяся внутри межпланетного токового слоя, который пересекает фронт ударной волны. Конкретная конфигурация функций распределения частиц и картины магнитных силовых линий данного явления могут быть выявлены при помощи МГД моделирования, что выходит за рамки данной работы. В месте взаимодействия двух токовых систем может развиваться область с очень слабым магнитным полем. В таком месте ионы уже не движутся под действием сил со стороны магнитного поля и, соответственно, могут выйти из магнитослоя через межпланетный токовый слой на внешнюю границу ударной волны навстречу потоку частиц солнечного ветра. Поток этих частиц, убежавших из магнитослоя, может иметь характеристики, отличные от тех, которые наблюдаются в месте, из которого он вышел; в частности, его температура может быть выше.

Высокая ионная температура наблюдаемого диспергированного пучка может быть результатом двухпучковой неустойчивости, которая развивается в области взаимодействия пучка с солнечным ветром и приводит к искажению структуры токового слоя и модуляциям напряженности магнитного поля в месте наблюдения пучка (см. рис. 2.1).

Приведённые рассуждения свидетельствуют в пользу того, что ионы, зарегистрированные спутниковой группировкой Cluster 22 февраля 2006 года перед фронтом ударной волны внутри аномалии горячего потока, а также пучок ионов в прилегающей области, диспергированный по скоростям, являются ионами из магнитослоя, которые прошли внутрь токового слоя через место его пересечения с ударной волной, а затем начали распространяться вдоль него навстречу частицам солнечного ветра.

Это выглядит вполне естественно ввиду того, что магнитное давление принимает наименьшее значение внутри токового слоя, и концентрация частиц солнечного ветра внутри него также меньше, чем в области невозмущенного солнечного ветра (см. рис. 2.6). Более детальный анализ требует проведения компьютерного моделирования для выявления того, может ли экспериментальное свидетельство убегания ионов из магнитослоя в токовый слой быть причиной формирования токового слоя, подобного тому, который анализировался в

работе. Также, требуется провести анализ большего числа случаев для того, чтобы узнать, насколько широко предложенный механизм может приводить к формированию отражённого пучка.

2.6 Выводы главы 2

Анализ свойств отраженного пучка внутри токового слоя, а также связанного с ним диспергированного пучка перед токовым слоем выявил ряд геометрических и физических характеристик, предполагающих распространение отраженного пучка внутри токового слоя. Наиболее вероятным объяснением возникновения пучка, зарегистрированного группировкой Cluster 22 февраля 2006 года в 01:09 UT, является то, что частицы пучка вышли из магнитослоя через место пересечения токового слоя и ударной волны магнитосферы Земли. Дальнейшее распространение частиц пучка происходит вдоль токового слоя. Ионы, имеющие гирорадиус больший, чем толщина токового слоя, формируют диспергированный пучок в области, прилегающей к токовому слою.

Глава 3. Характеристики аномалий горячего потока у Марса

3.1 Введение

В данной главе представлен статистический анализ характеристик распространения аномалий горячего потока у Марса, основанный на 19 событиях, зарегистрированных космическим аппаратом NASA Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN). Основываясь на количестве зарегистрированных в течение определенного времени наблюдения событий, сделан вывод о том, что АГП являются распространенным типом форшок-транзиентов у Марса, и частота их возникновения у этой планеты составляет 0.6 ± 0.3 события в день.

Предполагаемый размер исследуемых АГП начинается с 0,2 радиуса Марса; оценка верхнего предела этого параметра затруднена, поскольку обычно используемые методы дают значения до более десяти радиусов Марса, что намного превышает любой разумный размер форшок-транзиента у данной планеты. Скорость распространения наблюдаемых образований рассчитывалась как скорость движения линии пересечения между межпланетным токовым слоем и поверхностью головной ударной волны планеты. Будучи обнаруженными на солнечно-зенитных углах $53^\circ - 76^\circ$, почти все АГП, представленные в этом исследовании, распространяются в анти-солнечном направлении.

Используя информацию о скорости распространения АГП, была сделана верхняя оценка времени жизни каждой отдельной аномалии в момент ее регистрации в предположении, что она не может сформироваться до пересечения токовым слоем ударной волны в подсолнечной точке. Не было обнаружено видимой связи между временем жизни и размером АГП, что согласуется с предыдущим исследованием, показывающим, что эти структуры могут быть расширяющимися, сжимающимися или стабильными (Xiao et al., 2015).

Целями данного раздела являются: (1) выяснение частоты формирования АГП у Марса, (2) разработка метода оценки времени жизни АГП на момент их регистрации, (3) исследование связи времени жизни АГП с их размером.

3.2 Используемые данные

Исследование было проведено на данных, полученных космическим аппаратом NASA Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN), который находится на орбите Марса с конца 2014 года на 4,5-часовой орбите с апоцентром ~ 6400 км и перигеумом ~ 150 км. Наклонение его орбиты существенно изменялось в течение нескольких лет эксплуатации и составляло в среднем $\sim 75^\circ$.

В работе были использованы данные со следующих приборов: магнитометра (MAG; Connerney et al., 2015a, 2015b), анализатора ионов солнечного ветра (SWIA; Halekas et al., 2015,

2017), анализатора электронов солнечного ветра (SWEA; Mitchell et al., 2016) и прибор для ионного энерго-масс-спектрометра для анализа тепловых и надтепловых ионов (STATIC; McFadden et al., 2015). MAG напрямую измеряет три компонента напряженности магнитного поля с частотой 32 Гц. Прибор SWIA предназначен для измерения функции распределения ионов солнечного ветра в поле зрения $360^\circ \times 90^\circ$ в диапазоне энергий от 5 эВ до 25 кэВ и имеет энергетическое разрешение 14,5%. Его угловое разрешение составляет $3,75^\circ \times 4,5^\circ$ в солнечном направлении и $22,5^\circ \times 22,5^\circ$ в других направлениях. Прибор установлен на основной платформе космического аппарата, и его ориентация была выбрана таким образом, чтобы охват потока ионов солнечного ветра был максимальным. SWIA не способен разрешать ионы разных масс, поэтому в данной работе все ионы, зарегистрированные прибором, рассматриваются как протоны. Прибор STATIC измеряет ионный состав и функцию распределения в пределах того же поля зрения, что и SWIA, и в диапазоне энергий от $\sim 0,1$ эВ до 30 кэВ. Однако, будучи установленным на платформе для полезной нагрузки, шарнирно-сочлененной с космическим аппаратом 2-метровой штангой, направляющей поле зрения прибора в направлении скорости космического аппарата при прохождении перигелия, он регистрирует популяции ионов, отличные от тех, которые регистрируются SWIA. SWEA - это осесимметричный электростатический анализатор типа top-hat, который измеряет энергетическое и угловое распределения электронов с энергиями 3-4600 эВ с энергетическим разрешением 17% и угловым разрешением $\sim 20^\circ$, покрывая почти 80% неба.

3.3 Наблюдения

Для предварительного отбора кандидатов в АГП был использован список их отличительных особенностей, приведенный в (Schwartz et al., 2000) и составленный на основе исследования земных АГП. Данными особенностями являются: (1) наличие горячей центральной области (ядра); (2) меньшая скорость плазмы, чем в окружающем солнечном ветре; (3) наличие областей сжатия с обеих сторон от центральной области с увеличенной напряжённостью магнитного поля; (4) наличие межпланетного токового слоя в солнечном ветре, о чем свидетельствует различная ориентация вектора напряженности межпланетного магнитного поля (ММП) до и после события; (5) близость к головной ударной волне. В работе (Schwartz et al., 2000) также перечислены еще две особенности, которые не были использованы в данном исследовании по причинам, описанным ниже. (1) Наличие зашумленной области напряженности магнитного поля в ядре АГП, по-видимому, не является обязательным атрибутом события АГП, поскольку существуют наблюдения молодых АГП с двумя хорошо различимыми населенными ионами в ядре и гладкими профилями напряженности магнитного поля (см., Например, Wang et al. ., 2013; Vaisberg et al., 2016); (2) длительность наблюдения

события в несколько минут, подразумевающая, что характерный размер плазменного образования составляет несколько радиусов Земли, вероятно, не является обязательным атрибутом марсианских АГП из-за разных размеров головных ударных волн Земли и Марса, которые, по-видимому, оказывают значительное влияние на размер АГП (Collinson et al., 2014; Ugitsky и др., 2014), поэтому этот критерий также не рассматривался в качестве обязательного для отбора событий.

Сводные характеристики всех 19 событий данного исследования, которые были отождествлены как АГП, представлены в приложении 2. В данной главе компоненты вектора напряженности магнитного поля приводятся в орбитальной системе координат Марса (Mars Solar Orbit, MSO), начало которой находится в центре планеты, ось X направлена на Солнце, ось Y – против направления орбитального движения Марса вокруг Солнца, а ось Z дополняет систему координат до правой тройки векторов.

3.3.1 Пример молодой АГП

Рисунок 3.1 иллюстрирует событие №10 из приложения 2, которое было отождествлено в качестве молодой АГП из-за её малого времени наблюдения (~30 секунд) и неразвитой структуры – событие имеет относительно гладкий профиль напряженности магнитного поля, и в его ядре не наблюдаются его значительные флуктуации.

Данные магнитометра однозначно показывают наличие межпланетного токового слоя, что определяется различной ориентацией вектора напряженности магнитного поля до и после события. Данная АГП имеет ядро, характеризующееся значительным уменьшением напряженности магнитного поля (с ~2 нТл на переднем крае и ~3 нТл на заднем крае до <1 нТл) и скорости солнечного ветра (с ~330 км/с до ~300 км/с). Ядро аномалии окружено областями сжатия с двух сторон с увеличенной напряженностью магнитного поля (~5 нТл и ~9 нТл) и концентрацией ионов. АГП имеет горячую внутреннюю часть, что видно из измеренной прибором SWIA ионной температуры: она достигает более 15 эВ в ядре, в то время как в солнечном ветре её значение составляет около 5 эВ. Параметр β также имеет максимум в ядре и на переднем крае события.

На диаграмме энергия-время также видно наличие населения плазмы, которое сосуществует с пучком солнечного ветра в ядре аномалии. Это население частиц простирается далее в среду солнечного ветра в сторону, предшествующую прохождению межпланетного токового слоя.

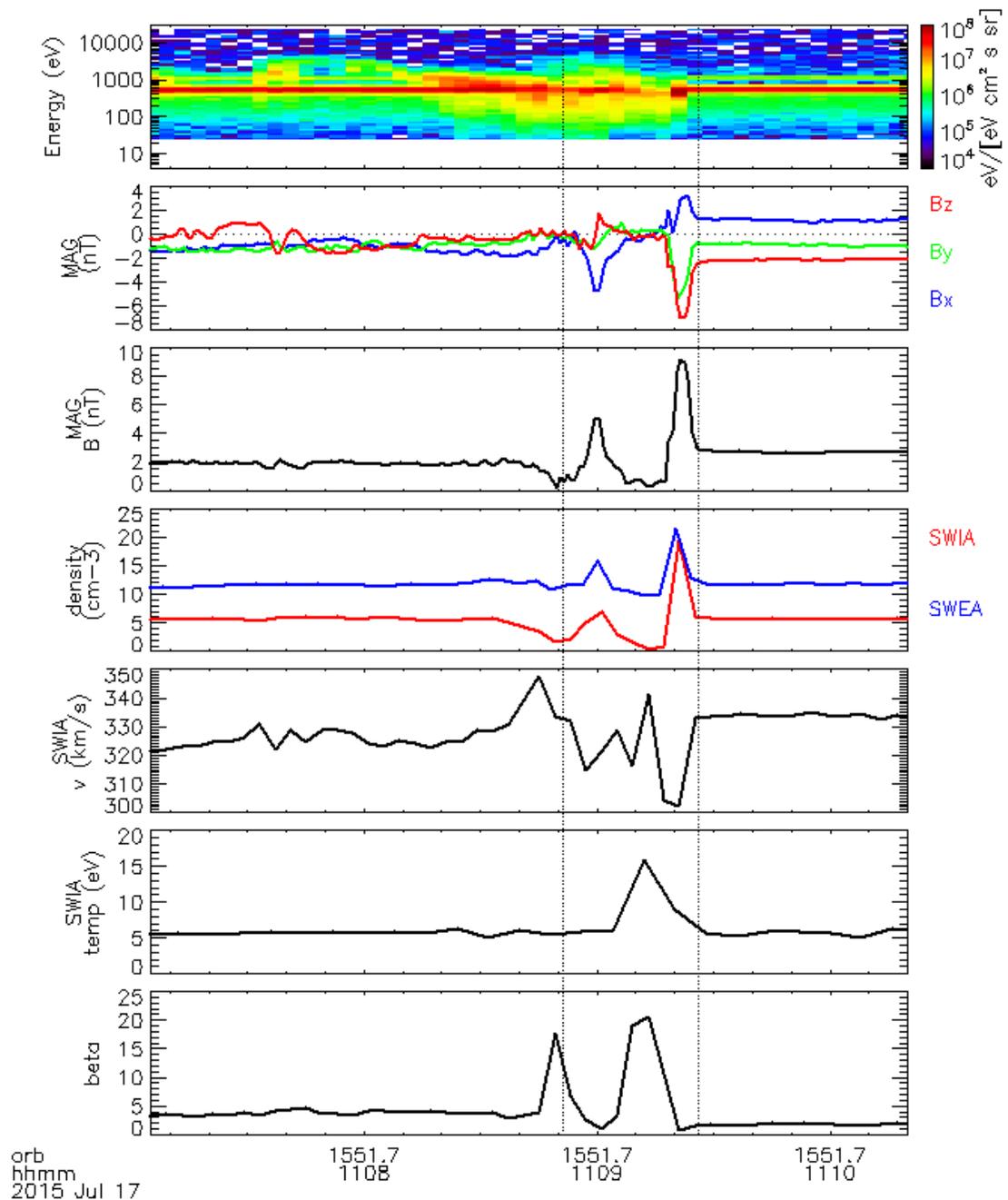


Рисунок 3.1. Пример молодой АГП у Марса, рассмотренной в данном исследовании (событие №10 из приложения 2). Сверху вниз приведены: дифференциальный поток энергии протонов (SWIA), 3 компонента вектора напряженности магнитного поля в системе координат MSO (MAG), модуль напряженности магнитного поля, концентрация ионов (красный) и электронов (синий), скорость ионов, усредненная по всему измеренному ансамблю (SWIA), ионная температура, рассчитанная по измерениям SWIA, параметр β . Вертикальные пунктирные линии обозначают границы события.

3.3.2 Пример зрелой АГП

Событие №19 из приложения 2 было отождествлено в качестве зрелой АГП, так как оно имеет большую длительность (~201 секунду), сильно возмущенный профиль напряженности магнитного поля в ядре и приводит к существенным возмущениям в солнечном ветре (см. рисунок 3.2).

Аналогично предыдущему случаю, присутствие токового слоя однозначно видно по смене ориентации вектора напряженности межпланетного магнитного поля во время регистрации события. Ядро аномалии окружено двумя областями сжатия, в которых напряженность магнитного поля возрастает до ~10 нТл, по сравнению с ~5 нТл в окружающем солнечном ветре. Наблюдаемый рост концентрации ионов в областях сжатия составляет с ~5 см⁻³ до ~10 см⁻³. Эти данные хорошо согласуются с данными концентрации электронов, приведенным по измерениям прибора SWEA, что говорит о том, что профиль концентрации измерен с достаточной степенью точности, и практически вся популяция частиц попала в поле зрения прибора. Скорость солнечного ветра снижается с ~450 км/с в окружающей среде до менее, чем 200 км/с в ядре аномалии. Температура ионов в ядре составляет ~35 эВ, что существенно превосходит температуру в солнечном ветре, которая составляет ~15 эВ. Параметр β , для расчета которого использовались концентрация ионов по показаниям SWIA и температура электронов по показаниям SWEA, имеет максимум в ядре события (~5) и в первой области сжатия (~3), в то время как в окружающем ветре его значение составляет ~1-1,5. АГП имеет очень горячую внутреннюю часть, что видно по данным электронной температуры.

Наличие популяции частиц, принадлежащей АГП и существующей в пространстве скоростей отдельно от пучка солнечного ветра чётко видно по данным энергетического и углового распределения ионов, представленным на рисунке 3.3 для 4 удаленных друг от друга моментов времени. На рисунке 3.3. для отображения функции распределения ионов используется проекция Хаммера (в отличие от предыдущей главы, где была использована равнопромежуточная проекция), представляющая собой вид псевдоцилиндрической проекции, сохраняющей площади. Данный выбор обусловлен тем, что поле зрения прибора STATIC не покрывает большие полярные углы, и данное отображение позволяет оценить видимую часть функции распределения относительно всей сферы. Первая и четвертая колонки на рисунке 3.3 демонстрируют невозмущенный солнечный ветер до и после регистрации события, соответственно, без каких-либо других значительных популяций частиц в пределах поля зрения прибора. Во второй колонке показана функция распределения ионов внутри передней области сжатия АГП, где солнечный ветер сопровождается еще одним пучком, имеющим более широкое распределение по энергии и угловой размер. Центр этого пучка составляет угол ~60° с

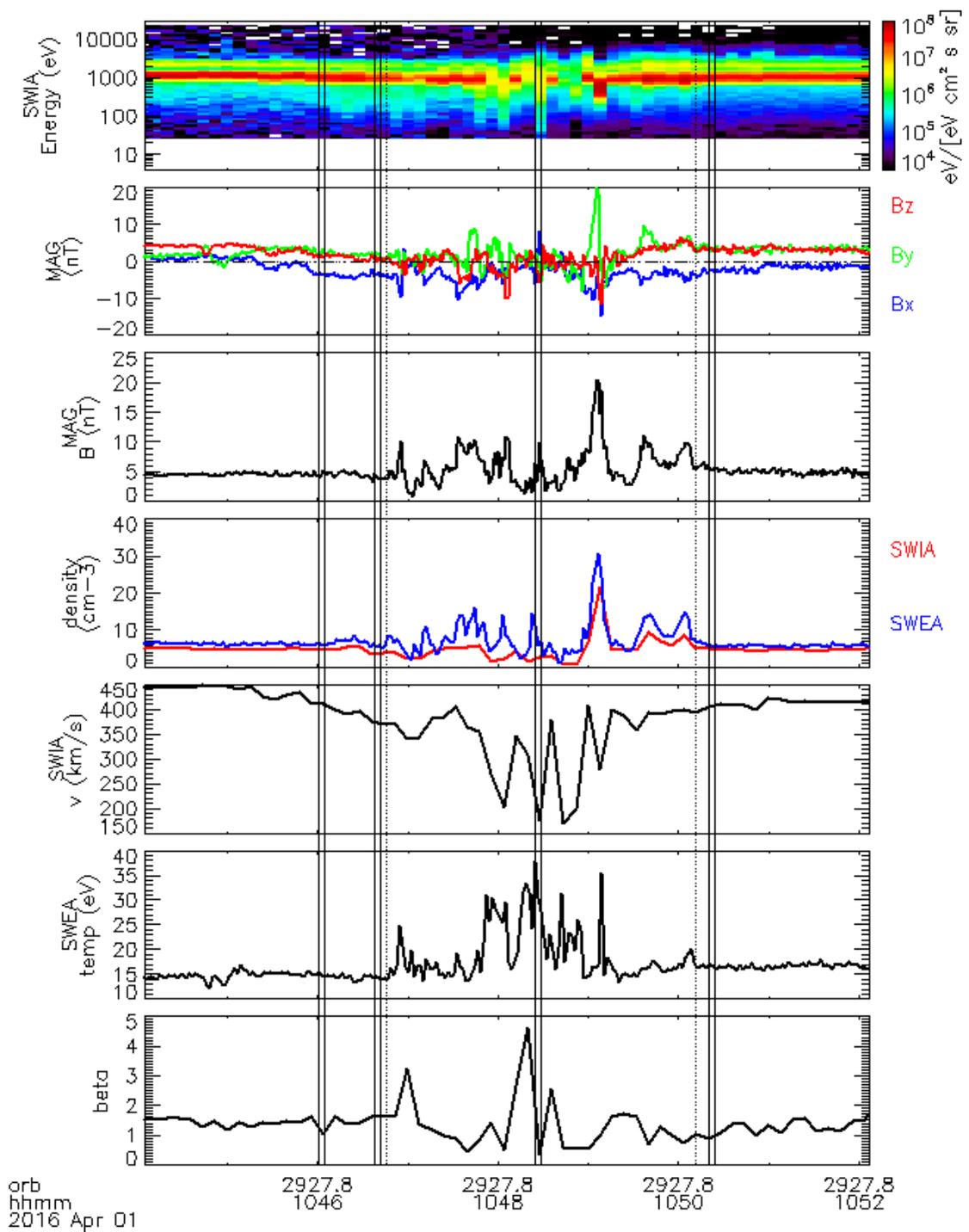


Рисунок 3.2. Пример зрелой АГП у Марса, рассмотренной в данном исследовании (событие №19 из приложения 2). Сверху вниз приведены: дифференциальный поток энергии протонов (SWIA), 3 компонента вектора напряженности магнитного поля в системе координат MSO (MAG), модуль напряженности магнитного поля, концентрация ионов (красный) и электронов (синий), скорость ионов, усредненная по всему измеренному ансамблю (SWIA), ионная температура, рассчитанная по измерениям SWIA, параметр β . Вертикальные пунктирные линии обозначают границы события. Четыре пары черных вертикальных сплошных линий обозначают периоды времени, приведенные на рисунке 3.3.

солнечным ветром. Третья колонка изображает функцию распределения частиц внутри АГП, заметной особенностью которой является почти полное исчезновение узкого пучка солнечного ветра.

В целом, основываясь на наблюдениях двух событий, описанных выше, можно сделать вывод о том, что зрелая АГП отличается от молодой тем, что у первой есть намного большее и более зашумленное по показаниям напряженности магнитного поля ядро, в котором присутствует более горячая плазма, а также тем, что она приводит к большим возмущениям в солнечном ветре, нежели молодая АГП.

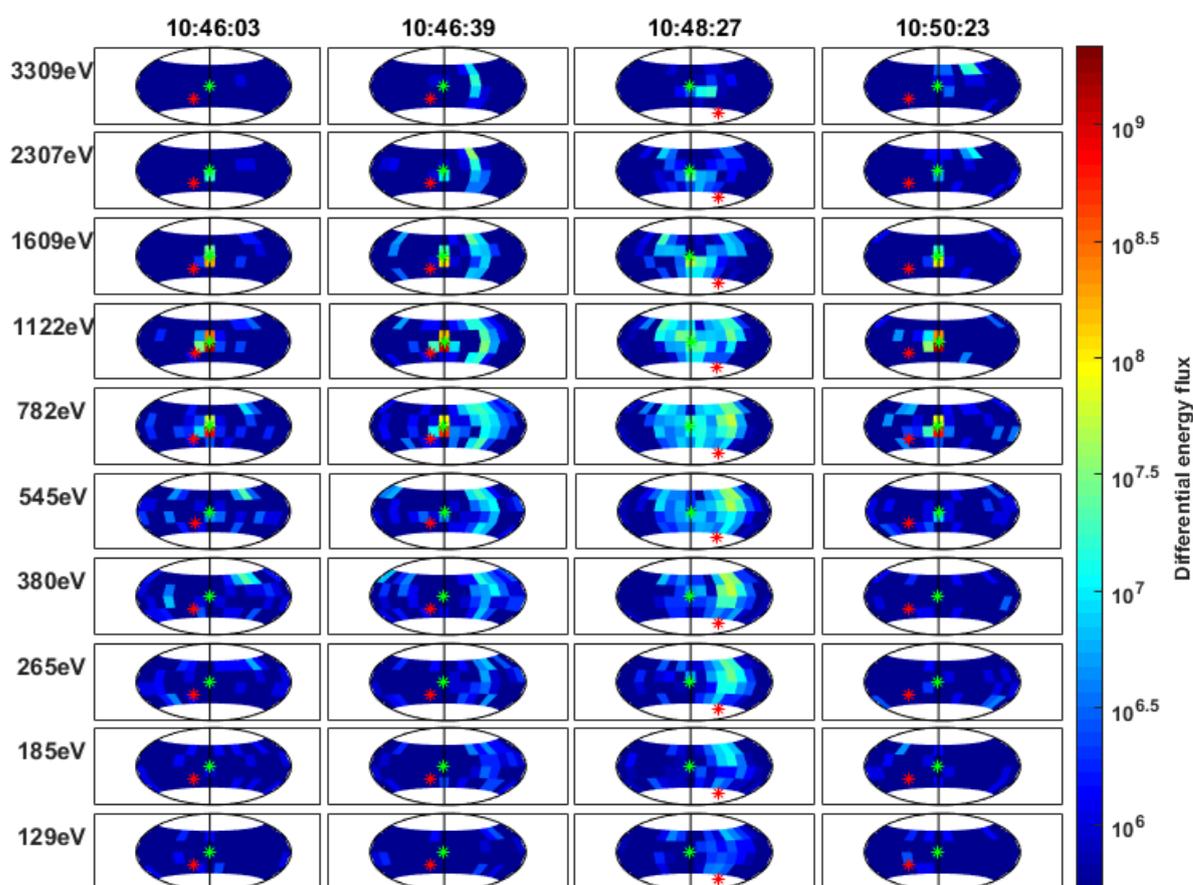


Рисунок 3.3. Функции распределения протонов при регистрации события №19 из приложения 2, измеренные прибором STATIC, в проекции Хаммера. Время накопления частиц для каждого измерения составляет 4 секунды. Зелёная звездочка указывает направление от Солнца; красная звездочка обозначает направление вектора напряженности магнитного поля. Единицы измерения дифференциального потока энергии — $\text{эВ} / (\text{стер} \times \text{сек} \times \text{эВ} \times \text{см}^2)$. Популяция частиц солнечного ветра расположена в центральной части каждого рисунка (столбцы 1, 2 и 4), а отраженный пучок – в правой части (2 и 3 столбцы).

3.4 Анализ

После визуального отбора кандидатов в АГП в соответствии с признаками, перечисленными в разделе 3.2.2, была проведена проверка того, что условия, при которых данные события были зарегистрированы, соответствуют условиям формирования АГП, приведенным в (Schwartz и др., 2000). Они следующие: (1) вектор наведенного солнечным ветром электрического поля направлен к токовому слою, по крайней мере, с одной из его сторон (Burgess, 1989, Thomas и др., 1991); (2) токовый слой должен быть почти параллелен линии «планета - Солнце», то есть угол θ_{nX} между нормалью к токовому слою \mathbf{n}_{CS} и осью X системы координат MSO должен быть близок к 90° , для того, чтобы разрыв передвигался вдоль фронта ударной волны достаточно медленно и АГП, таким образом, успела развиваться; (3) отношение между скоростью прохождения линии пересечения токового слоя и ударной волны вдоль фронта ударной волны V_{tr} и скоростью циклического движения ионов V_g в магнитном поле должно быть меньше 1, по крайней мере, с одной стороны от токового слоя; (4) головная ударная волна планеты должна быть квази-перпендикулярной хотя бы с одной стороны от токового слоя. Несмотря на то, что условия (2) и (4) выделены в качестве отдельных пунктов, их обобщение приведено в пункте (3), который дает более строгие требования к условиям в плазме для соответствия формированию АГП. Более подробно этот пункт обсуждается в разделе 3.4.2.

3.4.1 Определение нормалей к токовым слоям

Ориентации токовых слоев были рассчитаны в предположении тангенциального разрыва. Для вычисления нормалей была использована следующая формула (Hudson, 1970):

$$\mathbf{n}_{CS} = \frac{\mathbf{B}_{pre} \times \mathbf{B}_{post}}{B_{pre} \cdot B_{post}} \quad (3.1)$$

где \mathbf{B}_{pre} и \mathbf{B}_{post} – векторы напряженности магнитного поля до и после прохождения токового слоя, соответственно, усредненные по периоду времени, в течение которого возмущения поля были незначительными. Периоды усреднения приведены в приложении 2 в столбцах «Т до» и «Т после»; также в приложении приведен угол поворота вектора напряженности магнитного поля в токовом слое φ_B . X – компонента \mathbf{n}_{CS} для определенности выбрана неотрицательной.

3.4.2 Определение типа ударной волны

Нормаль к ударной волне \mathbf{n}_{BS} была вычислена в ближайшей к космическому аппарату точке на линии пересечения плоскости токового слоя и поверхности ударной волны, описанной

в модели (Trotignon и др., 2006). После этого, при использовании предположения о близости АГП к фронту ударной волны, параметр θ_{Bn} до и после пересечения токового слоя был определен как угол между \mathbf{n}_{BS} и \mathbf{V}_{pre} или \mathbf{V}_{post} , соответственно.

Квази-перпендикулярная ударная волна, по крайней мере с одной из сторон от АГП, была зарегистрирована в 13 из 19 исследованных случаев. Тем не менее, более общее условие $|V_{tr}/V_g| < 1$ было выполнено во всех 19 случаях с каждой стороны от события, при этом максимальное значение данного отношения достигало 0,68, и было зарегистрировано для переднего края события №9 из приложения 2. При расчете данной величины была использована формула из (Schwartz и др., 2000):

$$\left| \frac{V_{tr}}{V_g} \right| = \frac{\cos \theta_{CS:SW}}{2 \cos \theta_{BS:SW} \sin \theta_{Bn} \sin \theta_{CS:BS}} \quad (3.2)$$

где $\theta_{CS:SW}$ – угол между \mathbf{n}_{CS} и направлением скорости солнечного ветра, $\theta_{BS:SW}$ – угол между \mathbf{n}_{BS} и направлением скорости солнечного ветра и $\theta_{CS:BS}$ – угол между \mathbf{n}_{CS} и \mathbf{n}_{BS} . Требование наличия квази-перпендикулярной ударной волны по меньшей мере с одной стороны от токового слоя, приведенное в (Schwartz и др., 2000), возникает из-за наличия множителя $\sin \theta_{Bn}$ в знаменателе уравнения (3.2). Таким образом, условие $|V_{tr}/V_g| < 1$ более вероятно будет удовлетворено, когда ударная волна является квази-перпендикулярной. Тем не менее, это отношение также зависит от ориентации токового слоя относительно ударной волны и направления солнечного ветра, что также должно быть принято во внимание.

3.4.3 Оценка скорости АГП

Так как АГП распространяется вместе с линией пересечения головной ударной волны планеты и токового слоя, её скорость перпендикулярна нормали к ударной волне и имеет ту же проекцию на нормаль к токовому слою, какую имеет скорость солнечного ветра. Таким образом, можно записать (Schwartz и др., 2000):

$$\mathbf{V}_{tr} \cdot \mathbf{n}_{CS} = V_{SW} \cdot \mathbf{n}_{CS} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{V}_{tr} \cdot \mathbf{n}_{BS} = 0 \quad (3.4)$$

где \mathbf{V}_{tr} – вектор скорости АГП, а \mathbf{V}_{SW} – вектор скорости солнечного ветра. Уравнения (3.3) и (3.4) приводят к следующему выражению:

$$V_{tr} = \frac{V_{sw} \cdot n_{CS}}{\sin^2 \theta_{CS:BS}} \cdot (n_{CS} - \cos \theta_{CS:BS} n_{BS}) \quad (3.5)$$

Модули скоростей АГП, приведенных в данной работе, варьируются от 22 км/с (событие №10) до 419 км/с (событие №3), при этом средняя величина составляет 201 ± 31 км/с. Несмотря на то, что малая скорость токового слоя является одним из сопутствующих факторов формирования АГП, именно отношение $|V_{tr}/V_g| < 1$ является ключевым критерием развития форшок-транзиентов. Несмотря на то, что среднее значение модуля V_{tr} составляет почти половину скорости солнечного ветра, значение данного отношения было меньше 1 для всех событий данной работы с обеих сторон от токового слоя.

3.4.4 Размер АГП

Размер структуры АГП был оценен двумя различными способами, давшими близкие результаты в пределах ошибки 22%, за исключением событий №9 и №19, для которых расхождения составили 29% и 38%, соответственно. Первый способ заключается в умножении скорости распространения АГП V_{tr} на время её наблюдения спутником τ . Размер АГП, оцененный таким способом, в дальнейшем будет называться « V_{tr} size». Второй способ заключается в умножении τ на $(V_{sw} \cdot n_{CS})$; данную величину назовём « n_{CS} size». Различия этих двух методов оценки заключаются в направлении измерения размера АГП: в первом случае это направление вдоль скорости распространения события и перпендикулярное нормали к ударной волне, а во втором – направление, перпендикулярное токовому слою. Различия результатов, которые дают эти оценки, связаны с асимметрией АГП. На рисунке 3.4 приведено сравнение двух оценок. События №3, 6, 19 не включены в рисунок, так как их оцененные размеры, составляя более 10 радиусов планеты, превышали разумные значения для любого форшок-транзиента у Марса. Видно, что размеры событий вдоль нормали к токовому слою иногда меньше, чем их размеры вдоль скорости распространения, но не наоборот. Это, по-видимому, связано с тем, что АГП имеет тенденцию к вытягиванию вдоль поверхности токового слоя.

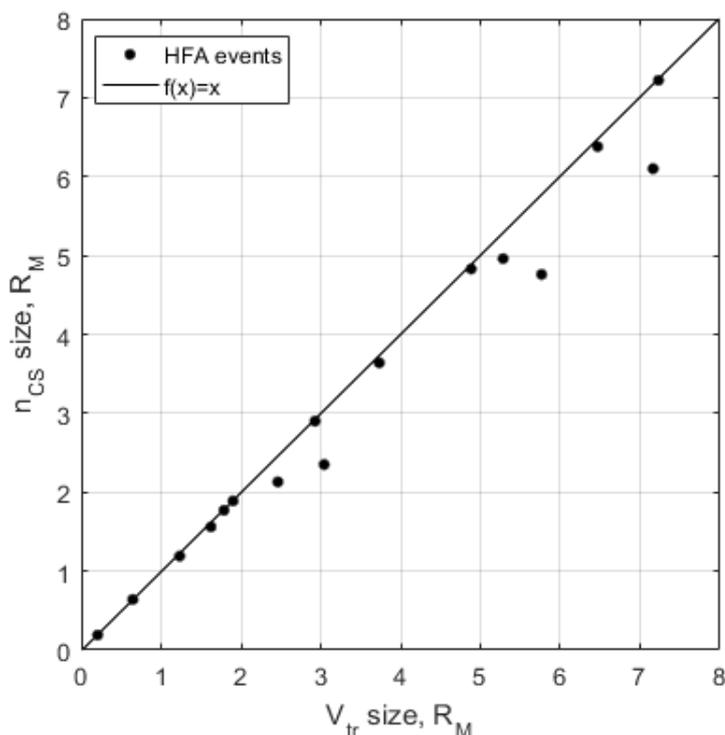


Рисунок 3.4. Сравнение размеров АГП, оцененных двумя способами. 3 события, оценка размеров которых превысила 10 радиусов планеты, не включены в рисунок.

3.4.5 Расстояние до ударной волны

Расстояние до ударной волны было вычислено как длина наикратчайшего отрезка, лежащего в плоскости токового слоя и соединяющего космический аппарат и среднее положение ударной волны согласно модели (Trotignon и др., 2006). Данный метод оценки был выбран исходя из предположения о том, что источник частиц, формирующих АГП, расположен на линии пересечения токового слоя и ударной волны. Пучок ионов распространяется вдоль разрыва навстречу солнечному ветру, меняя свои свойства в результате взаимодействия с ним и с токовым слоем. Имея достаточную статистику различных АГП, можно изучать свойства пучка на различных стадиях его конвекции по направлению от ударной волны.

Полученные оценки расстояния зарегистрированных АГП до ударной волны приведены на рис. 3.7 и обсуждаются далее.

3.4.6 Пространственное распределение событий

Оценка скорости распространения АГП V_{tr} , проведенная в разделе 3.4.3, показала, что только у 4 из 19 изучаемых событий компонента скорости X_{MSO} положительна, то есть почти все транзиенты распространяются в анти-солнечном направлении. Это следует из

геометрических свойств используемой модели формирования АГП, которая включает в себя среднее положение ударной волны и предположение о том, что токовый слой является бесконечной плоскостью, имеющей такую же скорость, что и солнечный ветер. Из этого следует, что линия пересечения токового слоя и фронта ударной волны движется по направлению к Солнцу меньшее время, чем от Солнца.

Для визуализации пространственного распределения зарегистрированных АГП была использована система координат MSE (Mars-Solar-Electric field), в которой ось X направлена к Солнцу, ось Y сонаправлена с электрическим полем солнечного ветра, а ось Z дополняет систему векторов до правой тройки. Вектор электрического поля был рассчитан до регистрации каждого события по формуле $\mathbf{E} = -\frac{1}{c}\mathbf{V}_{SW} \times \mathbf{B}$, где для \mathbf{B} были использованы измерения магнитометра MAG, а для \mathbf{V}_{SW} были использованы посчитанные на борту космического аппарата первые моменты функций распределения ионов по измерениям спектрометра SWIA. Распределение АГП в плоскости YZ системы координат MSE в сравнении с X-компонентами их скоростей распространения приведено на рисунке 3.5.

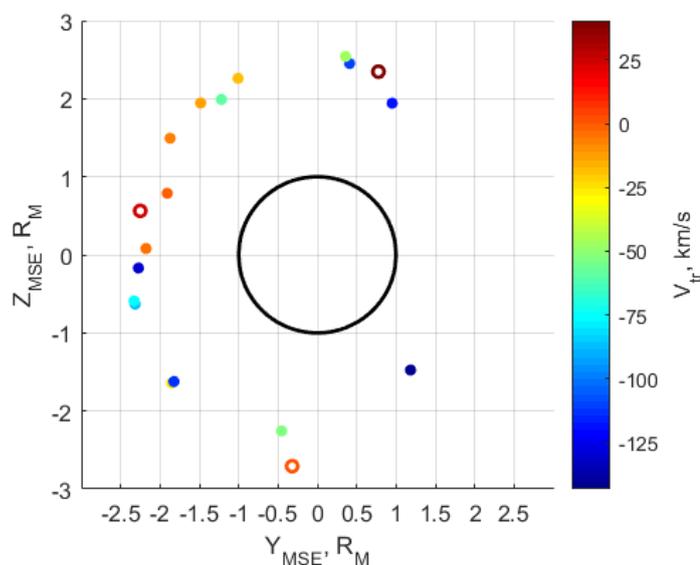


Рисунок 3.5. Пространственное распределение АГП, рассмотренных в данной работе, в плоскости YZ системы координат MSE. Цветом обозначены X_{MSO} -скорости распространения АГП, рассчитанные в разделе 3.4.3. События, движущиеся по направлению к Солнцу, отмечены кружками. Электрическое поле было рассчитано до регистрации каждого события.

3.4.7 Оценка времени жизни АГП

Так как почти все рассматриваемые события имеют отрицательную X-компоненту скорости V_{tr} (то есть почти все они движутся в анти-солнечном направлении), как это было отмечено в разделе 3.4.6, можно ввести верхнюю оценку времени жизни АГП в том

предположении, что формирование АГП маловероятно до пересечения токовым слоем подсолнечной точки на фронте ударной волны. Таким образом, время жизни АГП можно оценить путем разделения смещения токового слоя от момента пересечения им подсолнечной точки на фронте ударной волны до момента регистрации АГП по направлению скорости солнечного ветра, на скорость солнечного ветра (см. рисунок 3.6).

Полученные оценки времени жизни зарегистрированных АГП до ударной волны приведены на рис. 3.7 и обсуждаются далее.

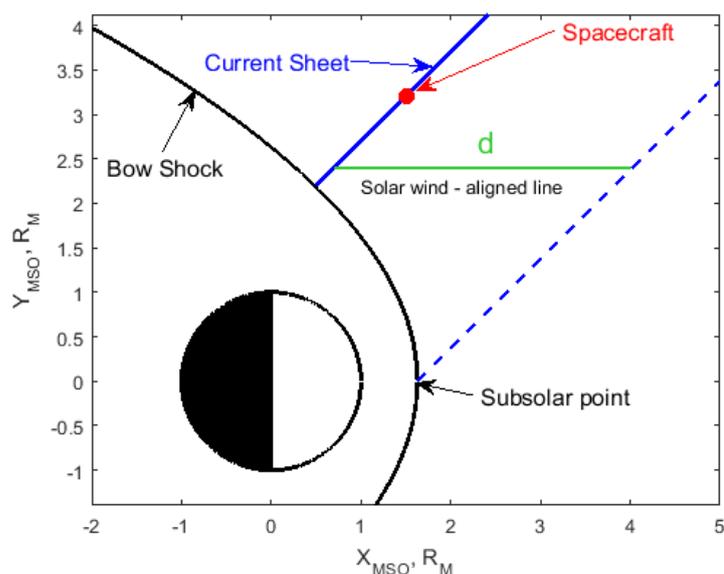


Рисунок 3.6. Объяснение алгоритма оценки возраста АГП. Сплошной черной линией отмечено среднее положение ударной волны согласно модели (Trotignon и др., 2006); сплошной синей линией отмечено положение токового слоя в момент регистрации события, а прерывистой синей линией – в момент пересечения им подсолнечной точки на фронте ударной волны; d – расстояние между этими плоскостями в направлении вектора скорости солнечного ветра.

3.4.8 Оценка частоты встречаемости АГП у Марса

Оценка частоты встречаемости АГП по данным одного космического аппарата, проходящим через различные плазменные оболочки планеты, должна быть проведена с учетом всего времени, которое аппарат находился в области, где АГП могут гипотетически быть зарегистрированы. С учётом того, что апоцентр орбиты MAVEN составляет всего $2,7 R_M$ (где R_M – радиус Марса) от центра планеты, то можно предположить, что любая точка, в которой находится космический аппарат перед фронтом ударной волны, является пригодной для формирования АГП.

Так как орбита MAVEN прецессирует в процессе годичного движения планеты, космический аппарат находится разное количество времени перед ударной волной в течение отдельного витка в разные месяцы, что усложняет расчет полного количества часов N , которое аппарат находится в интересующей области. Для некоторого упрощения было решено пренебречь эволюцией орбиты в течение периода времени, равному одной неделе, поэтому достаточно было посчитать количество часов, которое MAVEN находился перед фронтом ударной волны, только для первого дня каждой недели, и затем умножить это число на 7. Данный подход дал результат $N = 743$ часа. Данное число соответствует количеству времени, которое аппарат находился в солнечном ветре среди всего временного интервала, в течение которого проводился поиск событий АГП.

Обозначив количество часов, в течение которых было зарегистрировано k событий, за n_k , среднюю частоту формирования АГП $\langle f \rangle$ можно вычислить по формуле:

$$\langle f \rangle = \frac{\sum_{k=0}^2 k \cdot n_k}{N} \approx 0.0256 \frac{\text{АГП}}{\text{час}} \approx 0.61 \frac{\text{АГП}}{\text{день}} \quad (3.6)$$

где, как следует из приложения 2, $n_1 = 9$, $n_2 = 5$. Это означает, что среди всего времени наблюдений было 9 часов, в течение которых частота встречаемости АГП была равна 1 событию в час, и 5 часов, в течение которых эта частота была равна 2 событиям в час; в течение остального времени частота была равна 0 событиям в час. С учётом того, что частота встречаемости АГП в течение часа i равна f_i , стандартное отклонение $\sigma_{\langle f \rangle}$ среднего значения $\langle f \rangle$ можно оценить по следующей формуле:

$$\sigma_{\langle f \rangle} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (f_i - \langle f \rangle)^2} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{k=0}^2 n_k (k - \langle f \rangle)^2} \approx 0.11 \text{ АГП/день} \quad (3.7)$$

Таким образом, используя правила 3σ , получаем, что частота образования АГП на Марсе может быть оценена как $0,6 \pm 0,3$ событий в день в доверительном интервале 99,6%.

3.5 Обсуждение результатов

Оценка частоты возникновения АГП на Марсе, проведенная в данной работе, соответствующая $0,6 \pm 0,3$ событий в день, похожа на венерианскую, составляющую $1,2 \pm 0,8$ событий в день (Collinson и др., 2014) и земную ($\sim 3,0$ событий в день, Schwartz и др., 2000). Тем не менее, эта величина сильно зависит от условий в солнечном ветре, которые меняются в зависимости от солнечного цикла, так как АГП, как правило, наблюдаются при быстром солнечном ветре. Скорость солнечного ветра при регистрации каждого из исследованных

событий данной работы была выше, чем 330 км/с и выше 500 км/с при регистрации 11 из 19 событий. При рассмотрении солнечного ветра быстрее 370 км/с в работе (Collinson и др., 2014) получена частота встречаемости АГП на Венере $4,2 \pm 2,7$ событий в день.

Размер АГП у Марса, оцененный в разделе 3.4.4, начинается от $0,2R_M$ и достигает десятков радиусов Марса, что значительно превосходит разумную оценку для данного параметра. Большие величины оценок размеров событий могут быть связаны с тем, что, по крайней мере в некоторых случаях, АГП не связаны жестко с движением токового слоя, который их породил, и могут рассматриваться в качестве «следа» на поверхности ударной волны, который продолжает существовать некоторое время после прохождения токового слоя.

Зависимость размера проанализированных АГП от расстояния до ударной волны и верхних оценок их времени жизни приведена на рисунке 3.7. Отсутствие событий в верхнем правом углу диаграммы, вероятно, подразумевает, что АГП имеют тенденцию быть шире вблизи ударной волны. Тем не менее, статистика, приведенная в данном исследовании, является недостаточной для выявления достоверных зависимостей. Требуется более глубокий анализ динамики и эволюции АГП для того, чтобы связать их геометрические свойства, время жизни и положение относительно ударной волны.

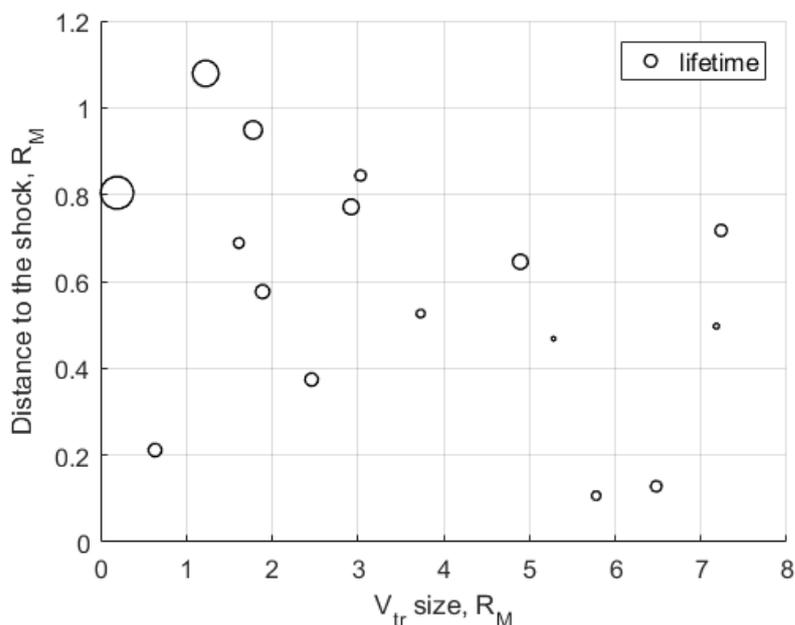


Рисунок 3.7. Точечная диаграмма, сравнивающая размеры АГП, посчитанные из их транзитной скорости, их время жизни и расстояние до ударной волны на момент регистрации. Размер каждого кружка пропорционален времени жизни, которое варьируется от 2 до 248 секунд.

События, чей размер превышает $10 R_M$ не отображены.

3.6 Выводы главы 3

Оказалось, что АГП являются частым типом форшок-транзиентов на Марсе, и их частота встречаемости составляет $0,6 \pm 0,3$ событий в день.

Размеры АГП, полученные путём умножения времени их наблюдения на скорость их распространения вдоль фронта ударной волны или на проекцию скорости солнечного ветра на нормаль к токовому слою, составляют от $\sim 0,2 R_M$ до нескольких радиусов Марса, причем в некоторых случаях эта величина превышала десять радиусов Марса, что намного превосходит адекватную оценку для данного параметра. Причины столь больших оценок размеров требуют дальнейшего исследования. Также, сравнение оценок размеров АГП этими двумя способами показало, что данные образования имеют тенденцию к вытягиванию вдоль ТС.

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.

Глава 4. Дневная магнитосфера Марса

4.1 Введение

В отличие от Земли, у Марса отсутствует глобальное дипольное магнитное поле, что делает плазменную оболочку Марса примерно на порядок компактнее земной в выражении наименьшего расстояния от планеты до ударной волны. Также у Марса присутствует горячая кислородная корона из нейтральных атомов, простирающаяся за пределы головной ударной волны планеты из-за её малого гравитационного притяжения. Основным источником атомов кислородной короны является процесс диссоциативной рекомбинации (ДР) ионов молекулярного кислорода в ионосфере ($O_2^+ + e \rightarrow O + O + \text{энергия}$). Следуя законам сохранения энергии и импульса, свободная энергия делится поровну между двумя нейтральными атомами кислорода, сообщая им некоторую тепловую скорость, вследствие чего происходит разогрев короны. Следующими по величине вклада в обогащение короны являются процессы ДР ионов CO_2^+ и O_2^+ . Ещё более слабыми источниками атомарного кислорода являются ДР ионов CO^+ и фотодиссоциация CO_2 (см. Lee и др., 2015).

Нейтральные частицы кислородной короны ионизируются солнечным ультрафиолетовым излучением и, при наличии ненулевой компоненты межпланетного магнитного поля \mathbf{B} , перпендикулярной направлению скорости солнечного ветра V_{sw} , начинают дрейфовать, двигаясь по циклоиде, по направлению скорости солнечного ветра в скрещенных магнитном \mathbf{B} и электрическом $\mathbf{E} = -(1/c) V_{sw} \times \mathbf{B}$ полях (рис. 4.1). Данный процесс в англоязычной литературе называется pick-up.

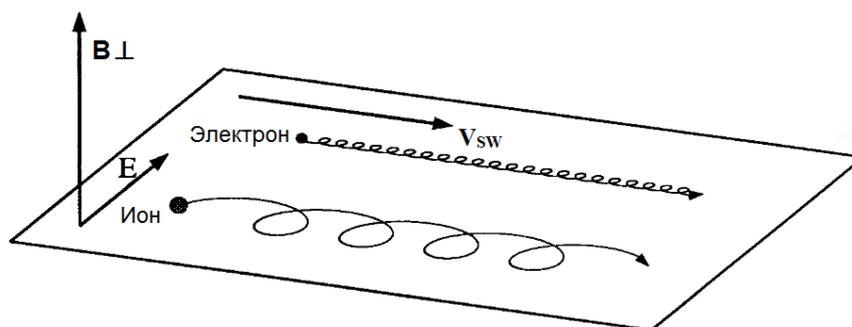


Рисунок 4.1. Траектории захваченных солнечным ветром частиц. V_{sw} – направление скорости солнечного ветра, \mathbf{B}_\perp – компонента магнитного поля, перпендикулярная направлению скорости солнечного ветра, $\mathbf{E} = -(1/c) V_{sw} \times \mathbf{B}$ – электрическое поле (из Kivelson, 1995).

В процессе дрейфа скорость захваченных частиц меняется во времени по гармоническому закону, причем если в момент захвата частица покоилась, то её максимальная скорость (в «верхней» точке циклоиды) составляет $2V_{sw}$. Таким образом, pick-up может

разгонять тяжёлые частицы планетного происхождения до очень больших энергий – ионы атомарного кислорода O^+ разгоняются до 64 энергий солнечного ветра, а максимальные энергии O_2^+ и CO_2^+ могут измеряться сотнями кэВ. Примечательно, что максимальная энергия частиц не зависит от напряженности и ориентации межпланетного магнитного поля и определяется только скоростью солнечного ветра – магнитное поле влияет только на размер гирорадиусов захваченных частиц и на время их ускорения. Как правило, ионы из дневной части кислородной короны Марса к моменту достижения ими ионосферы не успевают совершить полного периода обращения, и их энергии не превышают ~ 10 кэВ.

Аналогичный процесс, протекающий в ионосфере Марса, приводит к появлению низкотемпературного потока ускоряющихся от Марса частиц в направлении межпланетного электрического поля (рис. 4.2). Этот поток в англоязычной литературе носит название *plume* и составляет значительный (от 20% до 30%, в зависимости от условий в солнечном ветре и интенсивности ультрафиолетового излучения) канал атмосферных потерь (см., например, Dong и др., 2015).

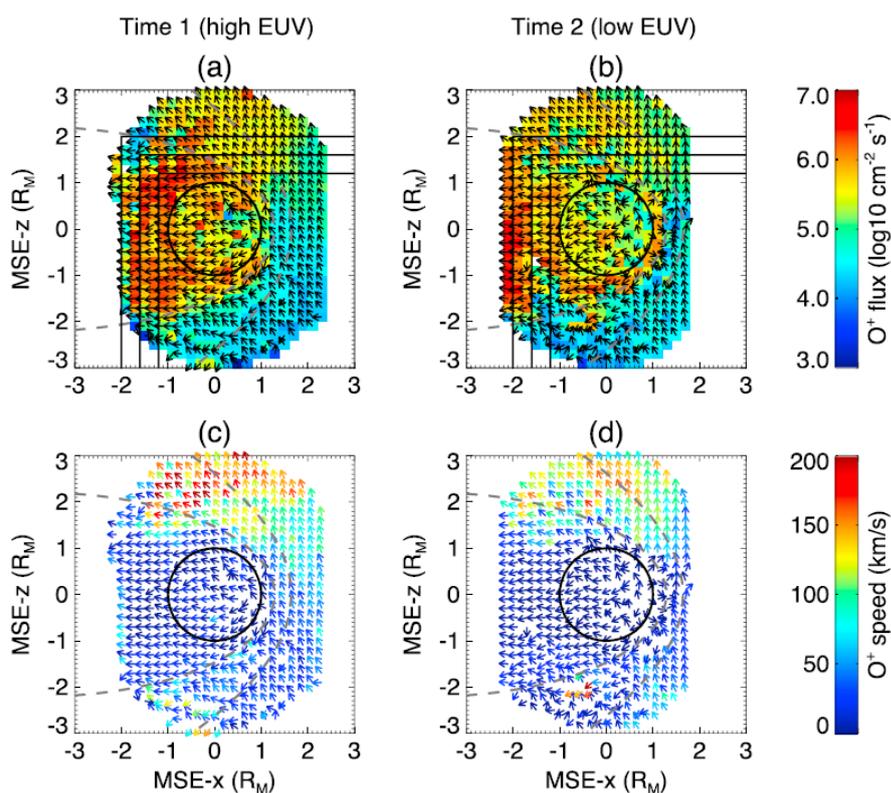


Рисунок 4.2. Скорости (c)-(d) и потоки (a)-(b) O^+ в окрестности Марса по измерениям MAVEN. Ось X направлена на Солнце, ось Z сонаправлена с межпланетным электрическим полем. Графики (a)-(c) соответствуют высокой интенсивности ультрафиолетового излучения, (b)-(d) – низкой. В полуплоскости +Z наблюдается *plume*, содержащий ускоренные ионосферные частицы (Dong и др., 2017).

В течение первых лет освоения космоса считалось, что при формировании головной ударной волны препятствием для солнечного ветра в случае Марса является магнитное поле, генерирующееся ионосферными токами, индуцированными электрическим полем солнечного ветра (Dessler, 1968). Термин «магнитосфера Марса» был введен при изучении первых данных, полученных в окрестности Марса с пролетных траекторий (см., например, Van Allen, 1965), и использовался для описания магнитного хвоста – области на ночной стороне планеты, где силовые линии магнитного поля солнечного ветра вытягиваются вдоль линии «планета – Солнце» – в то время как морфологически связанная силовыми линиями магнитного поля с ним область на дневной стороне долгое время оставалась неизученной. Так, магнитосфера Марса была названа «индуцированной» в предположении, что токи, наведенные электрическим полем солнечного ветра, играют главную роль в ее формировании (Michel, 1971). В 1970-х, космические аппараты Марс-2, -3 и -5 зарегистрировали у Марса головную ударную волну и плазменный хвост из убегających тяжелых ионов атмосферного происхождения (Долгинов, 1976; Вайсберг, 1976, 1992). Также, этими космическими аппаратами были проведены первые измерения плазмы при пересечении дневной магнитосферы Марса, которые зарегистрировали (Bogdanov и Vaisberg, 1976) увеличение напряженности магнитного поля в этой области до ~30 нТ и ионы с более низкими энергиями, чем те, что наблюдались в области обтекающего потока (термализованного на ударной волне солнечного ветра). Эти особенности были интерпретированы как наличие пограничного слоя на дневной стороне (Szego и др., 1998).

Последующие наблюдения на аппарате Фобос-2 (Szego и др., 1998) и Марс-Экспресс (Ramstad и др., 2017) значительно улучшили понимание устройства плазменной оболочки Марса. Так, с помощью космического аппарата Mars Express был впервые измерен ионный состав в области дневной магнитосферы (см., например, Dubinin и др., 2008a, 2008b). Оказалось, что в ней преобладают ионы планетного происхождения, и также присутствуют протоны, чья концентрация значительно меньше, чем в обтекающем потоке. Также было обнаружено, что повышенная напряженность магнитного поля сопровождается следующим за ней разрывом, названным границей магнитного сжатия (magnetic pileup boundary), однако эта граница существует не всегда и наблюдается только при определенных условиях в солнечном ветре. Ещё одной границей, открытой по этим данным, оказалась фотоэлектронная граница (photoelectron boundary), определяемая по резкому возрастанию концентрации фотоэлектронов до $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$.

Тем не менее, ограниченное временное разрешение ионных спектрометров не позволяло изучать дневную магнитосферу Марса, определяемую как область между магнитослоем и ионосферой (Dubinin и др., 2008), из-за её малой толщины (~100 км). Учитывая скорость исследовательских спутников $\geq 4 \text{ км/с}$, большой эксцентриситет их орбит и временное

разрешение измерений ионов, на предыдущих аппаратах превышающее 2 минуты, на каждой орбите проводилось не более 2 точек измерения в данной области, чего явно недостаточно для изучения её ионного состава и протекающих в ней процессов.

С выходом аппарата MAVEN на орбиту Марса в 2014 году появилась возможность детального изучения области дневной магнитосферы с помощью спектрометров с высоким временным разрешением. Более 5 лет измерений, проведенных этим космическим аппаратом (Jakosky и др., 2015) беспрецедентно расширили знания в области взаимодействия солнечного ветра с Марсом. Основываясь на этих данных, Halekas и др., 2017 сформулировали, что «магнитосфера Марса сформирована в результате прямых и опосредованных взаимодействий солнечного ветра с ионосферой Марса в результате комбинации эффектов индукции и массовой нагрузки». Термин «массовая нагрузка» (mass loading) является синонимом термина pick-up и означает заполнение силовых линий магнитного поля солнечного ветра тяжелыми ионами планетного происхождения посредством фотоионизации нейтральных частиц кислородной короны солнечным ультрафиолетовым излучением, в результате чего, следуя закону сохранения импульса, поток солнечного ветра тормозится, что, вследствие условия вмороженности, приводит к увеличению напряженности магнитного поля.

Минимальное временное разрешение измерений функции распределения ионов на аппарате MAVEN составляет 4 с, что позволило подробно проанализировать дневную магнитосферу Марса. Данное исследование основано на анализе 115 транзитов данного космического аппарата между термализованным на ударной волне потоком солнечного ветра и ионосферой на дневной стороне Марса (полный список пересечений приведен в приложении 3). Ранее, анализ 44 пересечений дневной стороны Марса в окрестности солнечно-зенитного угла $\sim 70^\circ$ в северном полушарии планеты выявил наличие магнитосферы как обособленной области на каждой из орбит спутника (Вайсберг и др., 2018). В данной работе обнаружено, что дневная магнитосфера представляет собой область со специфическим составом плазмы между обтекающим потоком и ионосферой. Пересечения для анализа были отобраны таким образом, чтобы спутник наблюдал ионосферу и обтекающий поток на одной орбите без сильных вариаций в магнитном поле плазмы в области обтекания солнечного ветра. Анализ распределения скоростей ионов в дневной магнитосфере показал, что плазма состоит из двух популяций: нагретых ионосферных частиц и захваченных электрическим полем солнечного ветра pick-up частиц из кислородной короны.

4.2 Наблюдения

В данном исследовании используются данные с тех же приборов, что и в главе 3. Однако в данной главе измерения частиц O^+ и O_2^+ прибором STATIC были очищены от ошибочно

отождествлённых измерений протонов. Такая ошибка отождествления происходит при больших скоростях счета протонов из-за неверного сопоставления сигналов «старт» и «стоп» во времяпролетной схеме прибора – стартовый импульс от новой частицы приходит раньше, чем предыдущая частица заканчивает движение во времяпролетном тракте. Для коррекции данной ошибки из дифференциального потока энергии частиц O^+ и O_2^+ было вычтено 8% от дифференциального потока энергии протонов из соответствующих энергетических и угловых ячеек².

На рис. 4.3 приведен пример наблюдений вдоль орбиты спутника MAVEN при его движении из обтекающего потока в ионосферу. Высота аппарата в момент времени 08:00:45 UT составляла ~320 км над поверхностью планеты, а солнечно-зенитный угол составлял ~6.5°.

Граница, часто называемая «граница ионного состава» (ion composition boundary) (Espley, 2018), определяемая равенством концентраций протонов и тяжёлых планетных частиц, это не только граница ионного состава, но и граница между потоком солнечного ветра с преобладанием быстрых протонов и потоком медленных планетарных ионов.

В начале приведенного интервала спутник находился в ионосфере, на что указывают энергетические спектры O^+ и O_2^+ , имеющие узкую ширину по энергии и большую величину дифференциального потока энергии. Видно, что ширина энергетических спектров этих ионов возрастает в течение интервала 7:58:10 – 8:00:45 UT, указывая на разогрев ионосферы в её верхней части.

² Данная методика была предложена профессором Дэвидом Брейном из лаборатории атмосферной и космической физики университета Колорадо в частной беседе. Величина коррекции в 8% была определена экспериментально при участии разработчиков прибора.

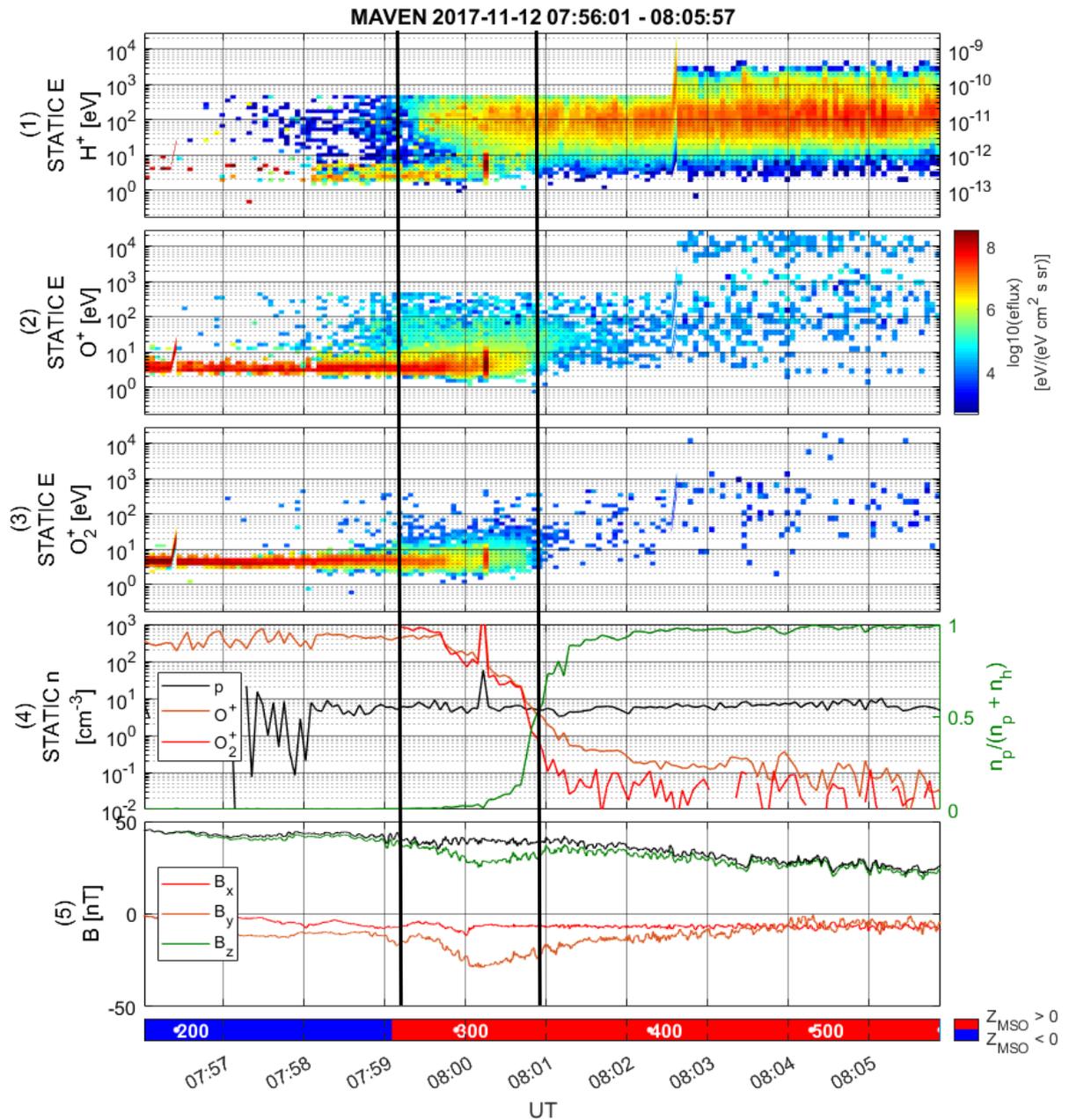


Рисунок 4.3. Данные приборов STATIC и MAG, полученные в окрестности подсолнечной точки Марса 12 ноября 2017 года. Сверху вниз: панели 1-3 – спектрограммы энергия-время для H^+ , O^+ , O_2^+ , соответственно; панель 4 – концентрации тех же частиц и отношение концентрации протонов к сумме концентраций O^+ и O_2^+ (зеленый); панель 5 – компоненты вектора напряженности магнитного поля в системе координат MSO и модуль напряженности поля (черный); красно-синяя полоса внизу рисунка отображает знак Z координаты спутника, цифры на ней показывают высоту аппарата над поверхностью планеты. Верхняя граница диапазона измеряемых энергий ионов до 08:02:40 UT составляет ~500 эВ. Границы магнитосферы обозначены вертикальными полосками.

Магнитопауза, граница между обтекающим потоком солнечного ветра и областью с доминирующими планетными ионами, определена как $n_p/(n_p + n_h) = 0.5$, где n_p - концентрация протонов, n_h - сумма концентрации ионов атомарного и молекулярного кислорода, и пересекается аппаратом в ~08:00:45 UT.

4.3 Анализ

На рисунке 4.4 приведена эволюция энерго-углового распределения дифференциального потока энергии частиц O^+ в течение 40-секундного интервала с 07:59:34 по 08:00:10 UT, соответствующего прохождению аппарата средней части магнитосферы. Каждый прямоугольник иллюстрирует распределение частиц в конкретный момент времени для конкретной ячейки измерений энергии по направлению вектора скорости в пределах азимутального угла от -180° до $+180^\circ$ (горизонтальная ось) и полярного угла от -45° до $+45^\circ$ (вертикальная ось) в системе координат, связанной с прибором. Цвет каждой угловой ячейки, размером $22,5^\circ \times 22,5^\circ$, соответствует величине дифференциального потока энергии частиц. Направление на азимутальный угол 0° и полярный угол 0° приблизительно соответствует вектору скорости движения спутника в интервале времени, приведенном на рисунке.

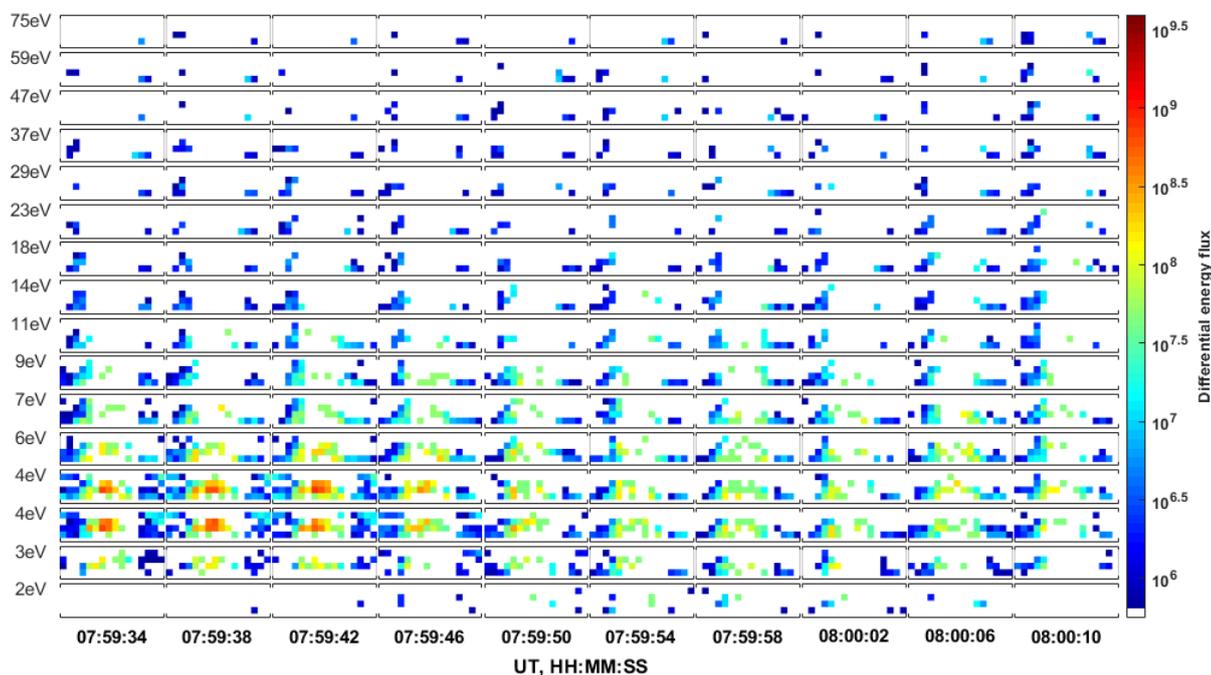


Рисунок 4.4. Эволюция энерго-углового распределения дифференциального потока энергии частиц O^+ в течение интервала времени с 07:59:34 по 08:00:10 UT 12 ноября 2017 года. Единицы измерения величины, отложенной на цветовой шкале, - $\text{эВ}/(\text{эВ} \times \text{см}^2 \times \text{сек} \times \text{стер})$.

На данном рисунке чётко видно наличие двух популяций: ионосферных частиц и частиц из кислородной короны Марса, захваченных электрическим полем солнечного ветра. Популяция частиц с направлением скорости, соответствующей вектору движения аппарата и имеющая энергии 2-11 эВ является частицами ионосферы; на рисунке 4.4 частицы этой популяции имеют красный, оранжевый и зеленый цвета. Её положение на угловой диаграмме объясняется тем, что тепловая скорость меньше, чем скорость движения аппарата. Вторая популяция, имеющая азимутальные углы примерно $+120^\circ$ и -120° и энергии от 2 до 75 эВ, является захваченными частицами кислородной короны Марса. Дифференциальный поток энергии этих частиц соответствует голубому и синему цветам на рисунке 4.4.

По мере движения спутника из ионосферы к магнитопаузе популяция ионосферных частиц становится шире распределенной по энергии, её средняя энергия увеличивается, а счёт частиц уменьшается. Это указывает на то, что верхний слой ионосферы состоит из разогретых частиц. На рисунке 4.4 видно, что ионосферная и pick-up популяции довольно хорошо разделены. Частичное перекрытие может происходить лишь на энергиях от 2 до 9 эВ в азимутальном секторе от $-112,5^\circ$ до -90° .

На рисунке 4.5 показана динамика изменения спектров ионов атомарного кислорода обеих популяций по мере движения спутника из ионосферы к обтекающему потоку солнечного ветра. Две пары спектрограмм приведены для того, чтобы можно было оценить ошибку разделения двух популяций, которая возникает из-за присутствия обоих сортов частиц в азимутальном секторе, соответствующего диапазону азимутальных углов от $-112,5^\circ$ до -90° . Цифры в заголовках приведенных спектрограмм на рис. 4.5 указывают на номера азимутов, выбранных для построения распределения (горизонтальные ячейки в функциях распределения, приведенных на рис. 4.4, пронумерованные слева направо). Как видно из приведенных пар графиков, различия в концентрациях частиц при различных способах разделения популяций составляют менее 10%.

Ионосферные частицы имеют малые скорости и температуру до $\sim 07:58:15$ UT. В более поздние моменты времени ионосферный компонент расширяется по энергии, особенно на высоких энергиях, в то время как его концентрация уменьшается. Часть ионосферных ионов пересекает магнитопаузу в $\sim 08:00:45$ UT с энергиями, достигающими до 50 эВ.

Профиль концентрации pick-up частиц и их распределение по энергии могут быть разделены во времени на две части. По мере приближения к планете, концентрация этих ионов возрастает и достигает максимума в магнитосфере $\sim 07:59:40$ UT. После этого момента времени концентрация данных частиц уменьшается, и наблюдается счет лишь в отдельных угловых ячейках.

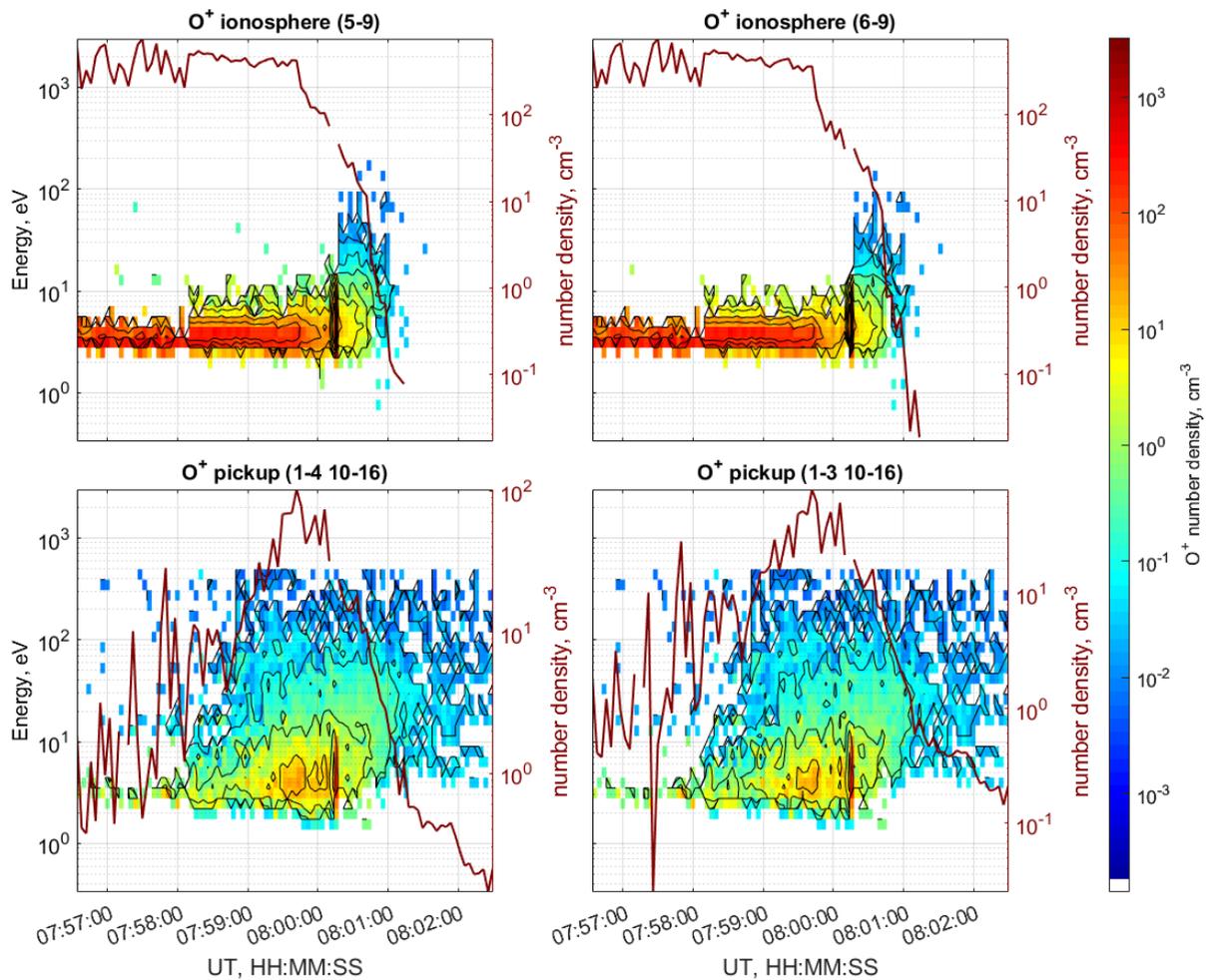


Рисунок 4.5. Диаграммы энергия-время частиц O^+ для ионосферной (сверху) и pick-up популяций частиц. Цветом обозначена концентрация, цветовая шкала приведена справа. Кривая суммарной концентрация изображена бордовой линией (шкалы значений приведены справа от каждой диаграммы). Для оценки ошибки разделения двух популяций, которая возникает из-за присутствия обоих сортов частиц в азимутальном секторе, соответствующего диапазону углов $-112,5^\circ$ до -90° , приведены 2 диаграммы для каждой популяции частиц (цифры в заголовках приведенных спектрограмм указывают на номера азимутов, выбранных для построения распределения).

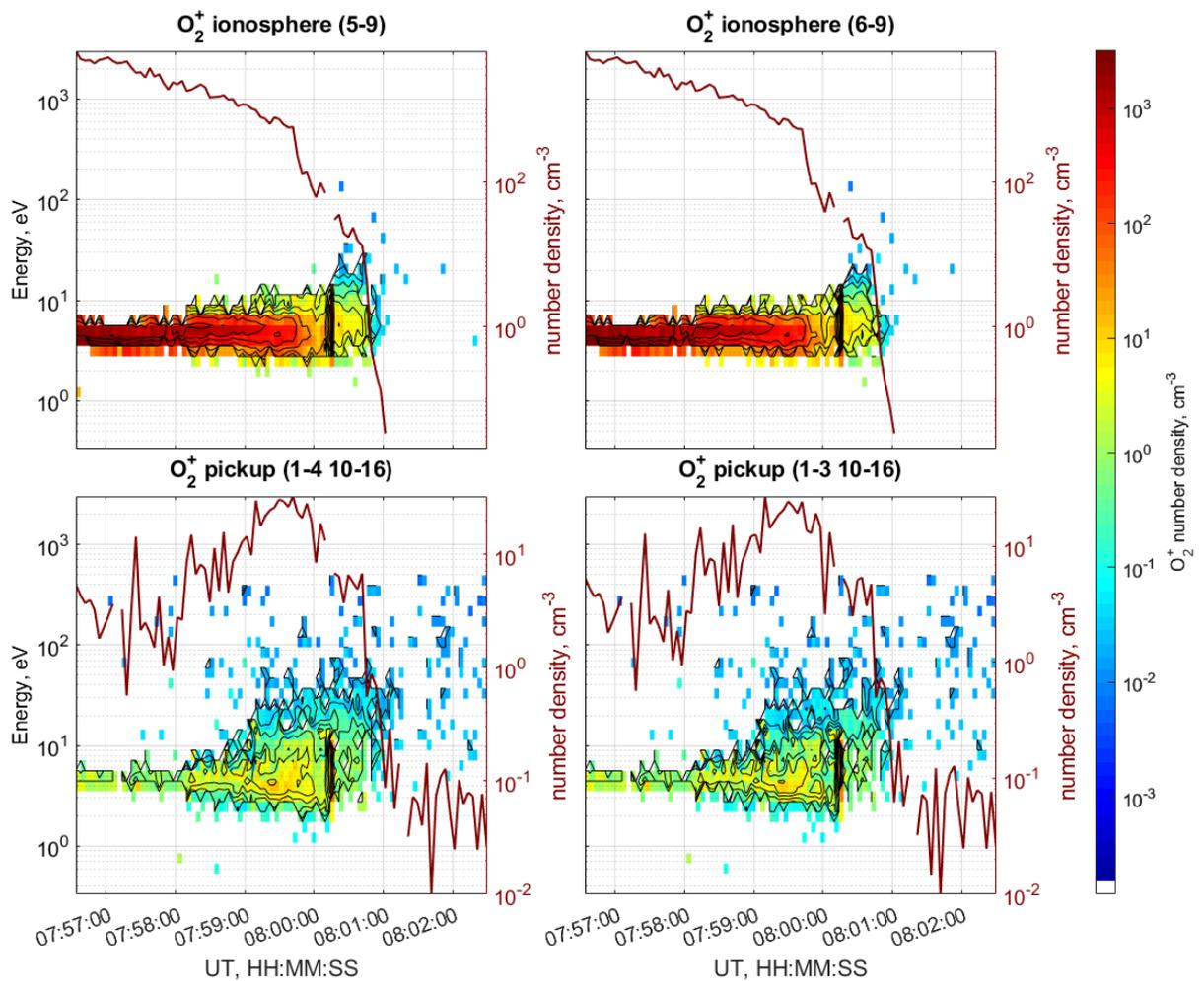


Рисунок 4.6. То же, что и рисунок 4.5, но для частиц O_2^+ .

На рисунке 4.6 приведены распределения, аналогичным представленным на рисунке 4.5, но для частиц O_2^+ . В целом, динамика ионов молекулярного кислорода соответствует поведению ионов O^+ , за исключением более узкого распределения по энергии ионов O_2^+ . Данное различие, по-видимому, связано с наличием горячей короны из частиц O^+ , простирающейся на значительно большие расстояния от Марса, чем экзосферные частицы O_2^+ , что приводит к большему ускорению первых в процессе захвата электрическим полем солнечного ветра. Диссоциативная рекомбинация молекулярного кислорода является значительным источником горячих ионов O^+ в верхней атмосфере Марса, она отвечает за формирование горячей кислородной короны и потерю планетой тяжёлых ионов (Ip, 1988, Fox, 1993, Крестьянникова и Шематович, 2005).

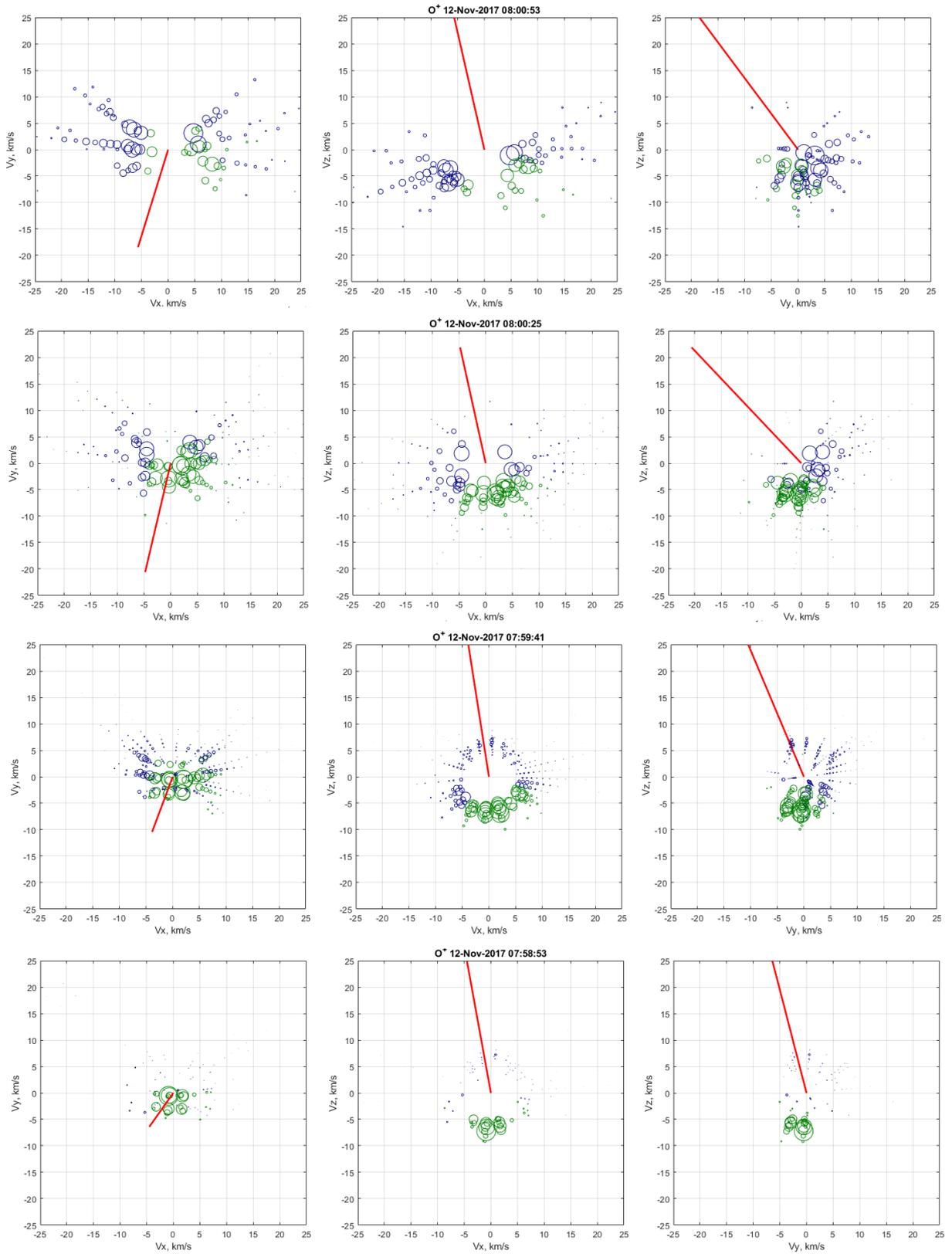


Рисунок 4.7. Функции распределения частиц O^+ в пространстве скоростей в проекциях V_x - V_y , V_x - V_z , V_y - V_z для четырех моментов времени. Размер окружностей пропорционален плотности частиц в пространстве скоростей. Синие окружности соответствуют *risk-ur* частицам, зеленые – частицам ионосферы. Красной линией обозначено направление вектора

напряженности магнитного поля. Моменты наблюдения соответствуют следующим положениям космического аппарата (сверху вниз): обтекающий поток, верхняя часть магнитосферы, середина магнитосферы, верхняя часть холодной ионосферы.

Типичные распределения скоростей pick-up и ионосферных частиц O^+ в системе координат MSO приведены на рисунке 4.7. Используются проекции V_x-V_y , V_x-V_z и V_y-V_z и моменты времени, соответствующие наблюдениям при движении из обтекающего потока по направлению к ионосфере (сверху вниз). Отрезки красного цвета с одним из концов в начале координат отображают ориентацию вектора напряженности магнитного поля в момент измерения. Важной особенностью приведенных распределений является то, что скорости значительной части pick-up частиц O^+ направлены к планете (приблизительное направление вдоль оси $-X$, с учётом того, что солнечно-зенитный угол в момент измерений составляет $\sim 6,5^\circ$). Это означает, что данные частицы проникают в ионосферу и взаимодействуют с ней.

Наблюдения спутника MAVEN свидетельствуют о том, что слой, находящийся между обтекающим потоком и дневной ионосферой Марса, в котором присутствуют как разогретая ионосферная популяция, так и захваченные ионы из кислородной короны, существует постоянно и является типичным явлением у данной планеты. Ещё один случай пересечения данной области, зарегистрированный аппаратом 13 марта 2016 года, приведен на рисунке 4.8. Нагретые и ускоренные ионосферные частицы, имеющие энергии от ~ 3 эВ до $\sim 5 \times 10^3$ эВ, заполняют область вплоть до обтекающего потока и сосуществуют с захваченными ионами кислорода.

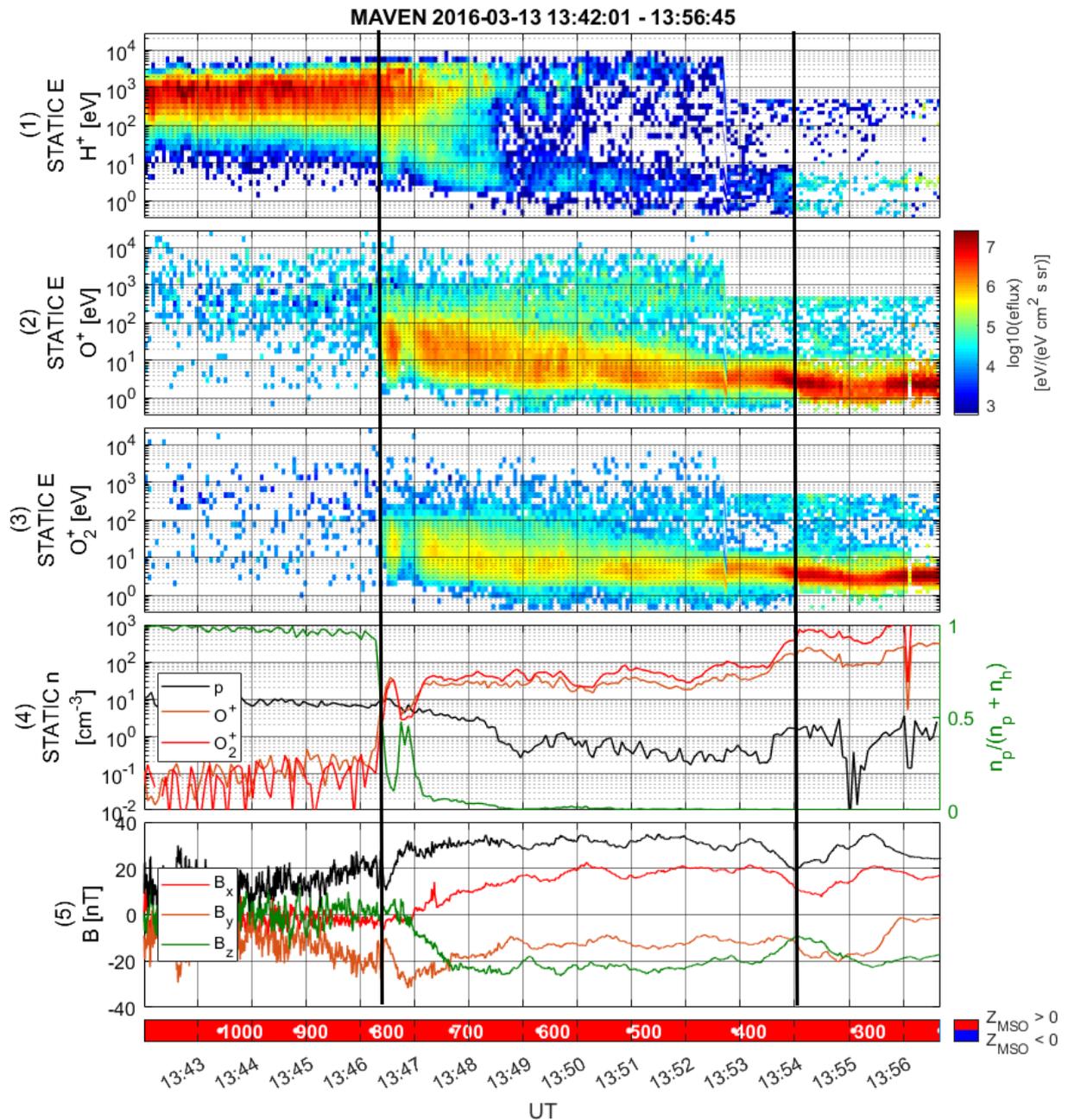


Рисунок 4.8. То же, что и рис. 4.3, для пересечения спутником MAVEN магнитосферы Марса 13 марта 2016 года.

4.4 Обсуждение

Визуальный анализ 115 пересечений (полный список пересечений приведен в приложении 3) аппаратом MAVEN области от дневной ионосферы до обтекающего потока показал, что дневная магнитосфера Марса является постоянно существующей структурой (см. также Вайсберг и др., 2018). Обнаружено, что в ней присутствует плазма двух различных популяций: разогретой ионосферы (с энергией до ~ 10 эВ) и захваченных электрическим полем солнечного ветра ионов кислорода (с энергиями от нескольких эВ до сотен эВ).

На рисунке 4.9 приведено сравнение теплового давления ионосферы и суммы динамического и теплового давления pick-up ионов для случая 12 ноября 2017 года. Примечательно, что эти давления совпадают в пределах погрешности измерений в рамках временного интервала от 07:59:45 UT до 08:00:45 UT. Левая граница данного интервала соответствует моменту времени, в который резко начинает возрастать (по ходу движения спутника) концентрация захваченных частиц; правая граница совпадает с пересечением спутником магнитопаузы, определяемой по соотношению $n_p/(n_p + n_h) = 0.5$. Равенство давлений двух популяций частиц свидетельствует об их взаимодействии. Ещё одним свидетельством в пользу взаимодействия этих частиц является то, что максимум концентрации pick-up частиц совпадает с моментом времени, когда наблюдаются наиболее энергичные частицы ионосферы.

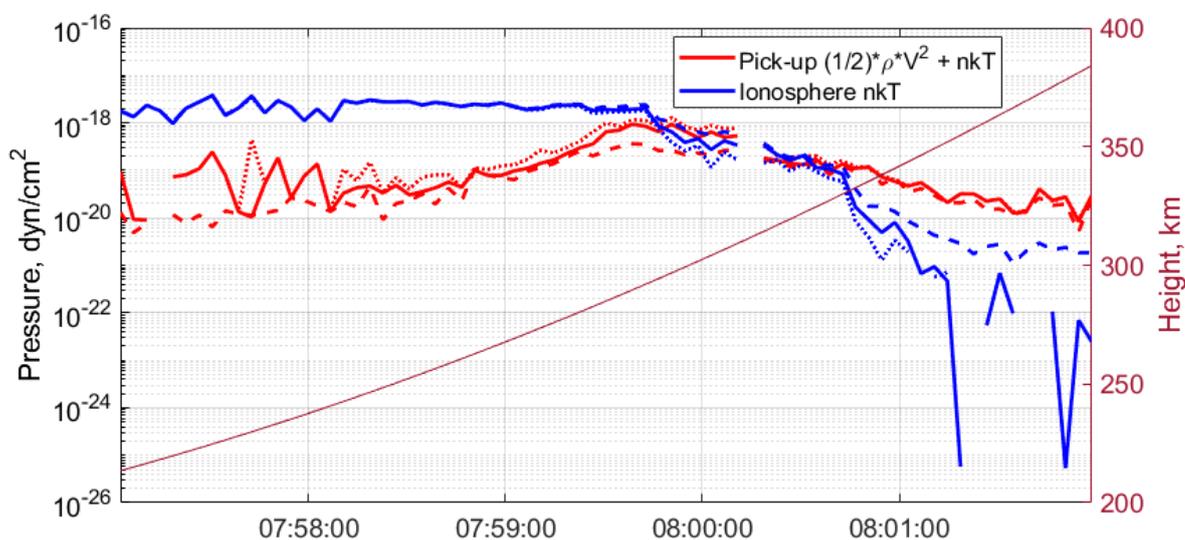


Рисунок 4.9. Сравнение теплового давления ионосферы и суммы теплового и динамического давлений захваченных частиц для случая пересечения магнитосферы 12 ноября 2017 г. (изображенном на рис. 4.3). Пунктирные и прерывистые линии обозначают погрешности измерения величин, связанные с неточностью выделения популяций в пространстве скоростей (процедура описана в разделе 4.3). Справа приведены высота спутника.

Детали этого взаимодействия можно увидеть на рисунке 4.7, где приведена функция распределения ионов атомарного кислорода по углам в трёх проекциях в разные моменты времени. Видно, что в области взаимодействия угловые распределение обеих популяций наиболее широкие.

Существует несколько механизмов, отвечающих за потерю энергии pick-up ионов: обмен зарядами с нейтральными частицами, столкновения с атомами атмосферы и взаимодействие

волна-частица. Однако, подробное исследование ролей этих процессов выходит за рамки данного исследования.

Изучение дневной магнитосферы Марса находится на начальной стадии, так как большая часть исследований до настоящего времени была сосредоточена на плазменном хвосте планеты и атмосферных потерях. Об этом свидетельствует неустановившаяся терминология в данной области и множество названий, предложенных для дневной магнитосферы и магнитопаузы, которые обсуждались в (Espley, 2018), где были упомянуты 9 названий: индуцированная магнитопауза (Michel, 1971), планетопауза (Riedler и др., 1989), магнитопауза (Riedler и др., 1989), граница массовой нагрузки (Лундин и др., 1990), граница ионного состава (Breus и др., 1991), ионопауза (Sauer и др., 1994), пограничный слой (Dubinin и др., 1996), магнитная pile-up граница (Crider et al., 2000), индуцированная граница магнитосферы (Lundin et al., 2004). Данный список не является исчерпывающим – в других публикаций можно найти прочие названия.

Проникновение популяции захваченных ионов кислородной короны в магнитосферу и её роль в формировании разогретой дневной ионосферы могла быть упущена столь долгое время по двум причинам. Во-первых, на диаграмме энергия-время эта популяция выглядит как высокоэнергичный хвост нагретой ионосферной популяции. Во-вторых, диапазон измерений энергий энерго-масс-анализатора STATIC часто переключается на измерения в более низком энергетическом интервале для изучения ионосферы с лучшим разрешением, таким образом, значительная часть pick-up частиц не регистрируется.

Взаимодействие Марса с солнечным ветром является уникальным, поскольку включает взаимодействие гидродинамических и кинетических процессов. Дневная магнитосфера не обладает свойствами, характерными для пограничного слоя: в ней не наблюдается постепенного или внезапного перехода из одного состояния в другое.

4.5 Выводы главы 4

Было проанализировано 115 транзитов космическим аппаратом MAVEN областей от разогретого на ударной волне солнечного ветра к ионосфере Марса на солнечно-зенитных углах от 0° до $\sim 70^\circ$. Рассматривались только прохождения в северном полушарии, чтобы избежать влияния магнитных аномалий поля марсианской коры. Было обнаружено, что между обтекающим потоком солнечного ветра и холодной ионосферой наблюдается область с нагретыми тяжелыми планетарными ионами O^+ и O_2^+ . Эта область была отождествлена как дневная магнитосфера Марса.

В этой области были выделены 2 типа частиц: нагретая ионосферная популяция и частицы, захваченные солнечным ветром. Функция распределения захваченных частиц по

скоростям в ионосфере близка к таковой в обтекающем потоке, что подтверждает происхождение частиц из этой области. Данная популяция сосуществует с разогретой и иногда ускоренной ионосферной популяцией.

Обнаружено, что популяция захваченных частиц, проникающая в магнитосферу, пополняется новыми частицами в этой области, что хорошо видно на рисунке 4.7 во временном интервале от 08:00:00 до 08:01:00. Это также подтверждается тем фактом, что гирорадиус захваченных частиц низких энергий (~80 км для ионов O^+ с энергией 2 эВ) приблизительно соответствует толщине магнитосферы (~90 км). Средняя энергия захваченных частиц уменьшается при движении от обтекающего потока к ионопаузе (границе между горячей и холодной ионосферой). Магнитосфера как обособленный слой между разогретым на ударной волне солнечным ветром и ионосферой состоит из смеси разогретых и разреженных частиц ионосферы и захваченным солнечным ветром экзосферных ионов.

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 аномалий горячего потока 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 токового слоя, породившего 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 токового слоя и ударной волны за счёт уменьшения магнитного давления со стороны солнечного ветра внутри токового слоя. Показано, что дальнейшее распространение частиц ядра аномалии происходит вдоль токового слоя, а прилегающий к нему пучок ионов сформирован из тех частиц ядра аномалии, чей гирорадиус превышает толщину токового слоя. Выявление еще одного механизма формирования АГП, представленного в главе 2, свидетельствует о том, что природа данных событий разнообразна, и дает данные для построения 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 токовому слою и вдоль направления скорости транзита события по фронту ударной волны. Сравнения этих двух размеров показали, что размеры событий вдоль нормали к токовому слою иногда меньше, чем их размеры вдоль скорости распространения, но не наоборот. Это связано с тем, что АГП имеют тенденцию к вытягиванию вдоль поверхности токового слоя, 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. Так как в дневной магнитосфере Марса происходит формирование магнитосферного хвоста, содержащего убегающие планетные ионы, то изучение процессов, протекающих в этой области, позволит лучше понять природу потери Марсом атмосферы в будущем.

Список сокращений

AMPTE - Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers

BS – Bow Shock

CIS – Cluster Ion Spectrometry experiment

CODIF – Composition and DIstribution Function instrument

CS – Current Sheet

FB – foreshock bubbles

FC – foreshock cavities

FCB – foreshock compressional boundary

FGM – FluxGate Magnetometer

GSE - Geocentric Solar Ecliptic System

HFA – Hot Flow Anomaly

HIA – Hot Ion Analyzer

ISEE - International Sun-Earth Explorer

MAG - MAGnetometer

MAVEN – Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN mission

MMS – Magnetospheric Multiscale Mission

MSE - Mars Solar Electric field coordinate system

MSO – Mars Solar Orbital coordinate system

NASA – National Aeronautics and Space Administration

STATIC – SupraThermal And Thermal Ion Composition instrument

SW – Solar Wind

SWEA – Solar Wind Electron Analyzer

SWIA – Solar Wind Ion Analyzer

THEMIS - Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms

UT – Universal Time

АГП – Аномалия Горячего Потока

ДР – диссоциативная рекомбинация

ЕКА – Европейское Космическое Агентство

КА – Космический Аппарат

МГД – Магнитная Гидродинамика

ММП – Межпланетное Магнитное Поле

ОНЧ-волны – очень низкочастотные волны

СВ – Солнечный Ветер

ТС – Токовый Слой

УВ – Ударная Волна

Доклады на конференциях по теме диссертации

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

Список публикаций автора

Публикации по теме диссертации

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

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 2π 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 Research*, 2017, 122, 10, 176–193. <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, N. 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>

Библиографический список используемой литературы

1. Blanco-Cano, X., N. Omidi, and C. T. Russell (2009), Global hybrid simulations: Foreshock waves and cavitons under radial IMF geometry, *J. Geophys. Res.*, 114, A01216, doi:10.1029/2008JA013406.
2. Breus, T. K., Krymskii, A., Lundin, R., Dubinin, E. M., et al., The solar wind interaction with Mars: Consideration of Phobos 2 mission observations of an ion composition on the dayside, *J. Geophys. Res.*, 96(A7), 11,165-11,174. <https://doi.org/10.1029/91AJA01131>
3. Burgess, D., and S. J. Schwartz, Colliding plasma structures: Current sheet and perpendicular shock, *J. Geophys. Res.*, 93, 11,327-11,340, 1988
4. Burgess, D., On the Effect of a Tangential Discontinuity on Ions Specularly Reflected at an Oblique Shock, *J. Geophys. Res.*, Vol. 94, No. A1, Pages 472-478, January 1, 1989
5. Burgess, D., & Scholer, M. (2015). *Collisionless shocks in space plasmas: Structure and accelerated particles*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
6. Chen, L. J., Wang, S., Ng, J., Bessho, N., Tang, J. M., Fung, S. F., et al. (2021). Solitary magnetic structures at quasi-parallel collisionless shocks: Formation. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL090800. <https://doi.org/10.1029/2020GL090800>
7. Collinson, G. A., et al. (2012), Hot flow anomalies at Venus, *J. Geophys. Res.*, 117, A04204, doi:10.1029/2011JA017277.
8. Collinson, G. A., et al. (2014), A survey of hot flow anomalies at Venus, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 978–991, doi:10.1002/2013JA018863.
9. Collinson, G., et al. (2015), A hot flow anomaly at Mars, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 9121–9127, doi:10.1002/2015GL065079.
10. Connerney, J. E. P., Espley, J. R., Di Braccio, G. A., Gruesbeck, J. R., Oliverson, R. J., Mitchell, D. L., et al. (2015a). First results of the MAVEN magnetic field investigation. *Geophysical Research Letters*, 42, 8819–8827. <https://doi.org/10.1002/2015GL065366>.
11. Connerney, J. E. P., Espley, J. R., Lawton, P., Murphy, S., Odom, J., Oliverson, R., & Sheppard, D. (2015b). The MAVEN magnetic field investigation. *Space Science Reviews*, 195(1-4), 257–291. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0169-4>.
12. Crider, D., Cloutier, P., Law, C., Walker, P., et al., (2000). Evidence of electron impact ionization in the magnetic pileup boundary of Mars. *Geophys. Res. Lett.*, 21(1), 45-48. <https://doi.org/10.1999GL003625>
13. Dolginov, Sh. Sh., 1976. The magnetosphere of Mars. In Williams, D.J. (Ed.), *Physics of the Solar Planetary Environment 2*. AGU, Boulder, p. 872.

14. Dong, Y., X. Fang, D. A. Brain, J. P. McFadden, J. S. Halekas, J. E. Connerney, S. M. Curry, Y. Harada, J. G. Luhmann, and B. M. Jakosky (2015), Strong plume fluxes at Mars observed by MAVEN: An important planetary ion escape channel, *Geophys. Res. Lett.*, 42, doi:10.1002/2015GL065346
15. Dong, Y., X. Fang, D. A. Brain, J. P. McFadden, J. S. Halekas, J. E. P. Connerney, F. Eparvier, L. Andersson, D. Mitchell, and B. M. Jakosky (2017), Seasonal variability of Martian ion escape through the plume and tail from MAVEN observations, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 4009–4022, doi:10.1002/2016JA023517.
16. Dubinin, E., R. Modolo, M. Franz, J. Woch et al., Structure and dynamics of the solar wind/ionosphere interface on Mars: MEX-ASPERA-3 and MEX-MARSIS observations, 2008, *Geophys. Res. Lett.*, VOL 35, L11103, doi:10.1029/2008GL0333730, 2008.
17. Dubinin, E., Sauer, K., Lundin, R., Norberg, O., et al., (1996). Plasma characteristics of the boundary layer in the Martian magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, 101(A12), 27,061-27,075. <https://doi.org/10.1029/96JA02021>
18. Eastwood, J. P., E. A. Lucek, C. Mazelle, K. Meziane, Y. Narita, J. Pickett, and R. A. Treumann (2005), The Foreshock, *Space. Sci. Rev.*, 118, 41–94.
19. Eastwood, J. P., et al. (2008), THEMIS observations of a hot flow anomaly: Solar wind, magnetosheath, and ground-based measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L17S03, doi:10.1029/2008GL033475.
20. Edmiston J. P., Kennel C. F., Eichler David, Escape of heated ions upstream of quasi-parallel shocks, *Geophysical Research Letters*, vol. 9 №5, pages 531-534, may 1982
21. Espley, J. R., The Martian magnetosphere: areas of unsettled terminology, *J. Geophys. Res., Space Phys.*, 123, 4521-4525, 2018. <https://doi.org/10.1029/2018/JA025278>
22. Facsko, G., K. Kecskemeti, G. Erdos, M. Tatrallyay, P. W. Daly, and I. Dandouras (2008), A statistical study of hot flow anomalies using Cluster data, *Adv. Space Res.*, 41, 1286–1291.
23. Facsko, G., et al., 2009, A global study of hot flow anomalies using Cluster multi-spacecraft measurements, *Annales Geophysicae*, 05/2009; 27(5). DOI: 10.5194/angeo-27-2057-2009
24. Formisano, V., Orientation and shape of the Earth's bow shock in three dimensions, *Planetary and Space Science*, VOL.27, p. 1151-1161, 1979.
25. Fox, J. L. (1993), On the escape of oxygen and hydrogen from Mars, *Geophys. Res. Lett.*, 20(17), 1747–1750, doi:10.1029/93GL01118.
26. Fuselier, S. A. (1995), Ion distributions in the Earth's foreshock upstream from the bow shock, *Adv. Space Res.*, 15, 43–52.
27. Ip, W.-H., (1988), On a hot oxygen corona of Mars, *Icarus*, 76, 135–145, doi:10.1016/0019-1035(88)90146-7

28. Halekas, J. S., Taylor, E. R., Dalton, G., Johnson, G., Curtis, D. W., McFadden, J. P., et al. (2015). The solar wind ion analyzer for MAVEN. *Space Science Reviews*, 195(1-4), 125–151. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-0029-z>.
29. Halekas, J. S., Ruhunusiri, S., Harada, Y., Collinson, G., Mitchell, D. L., Mazelle, C., et al. (2017). Structure, dynamics, and seasonal variability of the Mars-solar wind interaction: MAVEN solar wind ion analyzer in-flight performance and science results. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122, 547–578. <https://doi.org/10.1002/2016JA023167>.
30. Harvey, C. C. (1998), *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data*, Chapter 12: Spatial Gradients and the Volumetric Tensor, Gotz Paschmann and Patrick W. Daly (Eds.), ISSI Scientific Report SR-001 (Electronic edition 1.1), 1998, 2000 ISSI/ESA
31. Hudson, P. D. (1970), Discontinuities in an anisotropic plasma and their identification in the solar wind, *Planet. Space. Sci.*, 18, 1611–1622. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(70\)90036-X](https://doi.org/10.1016/0032-0633(70)90036-X)
32. Jacobsen, K. S., et al. (2009), THEMIS observations of extrememagnetopause motion caused by a hot flow anomaly, *J. Geophys. Res.*, 114, A08210.
33. Jakosky, B. M., J. M. Grebowsky, J. L. Luhmann, and D. A. Brain (2015), Initial results from the MAVEN mission to Mars, *Geophys. Res. Lett.*, 42, doi:10.1002/2015SCL065271.
34. Kivelson, M. G. Chapter 2: Physics of space plasmas. In: *Introduction to space physics*. Cambridge University Press, 1995, pp. 27-57. ISBN 0-521-45714-9.
35. Krest'yanikova, M. A., and V. I. Shematovich (2005), Stochastic models of hot planetary and satellite coronas: A photochemical source of hot oxygen in the upper atmosphere of Mars, *Sol. Syst. Res.*, 39, 22 –32, doi:10.1007/s11208-005-0002-9.
36. Lee, Y., M. R. Combi, V. Tennishev, S. W. Bougher, and R. J. Lillis (2015), Hot oxygen corona at Mars and the photochemical escape of oxygen: Improved description of the thermosphere, ionosphere, and exosphere, *J. Geophys. Res. Planets*, 120, 1880–1892, doi:10.1002/2015JE004890.
37. Lucek, E. A., T. S. Horbury, A. Balogh, I. Dandouras, and H. Rème (2004), Cluster observations of hot flow anomalies, *J. Geophys. Res.*, 109, A06207, doi:10.1029/2003JA010016.
38. Lundin, R., Zakharov, A., Pellinen, R., Borg, H., et al., (1990). Plasma composition measurements of the Martian Magnetosphere morphology, *Geoph. Res. Lett.*, 17(6), 877-880. doi/abs/10.1029/GL017i006p00877
39. Lundin, R., Barabash, S. Andersson, H., Holmstrom, et al., (2004). Solar wind-induced atmospheric erosion at Mars: First results from ASPERA-3 on Mars Express. *Science*, 305(5692), 5692, 1933-1936.

40. Lyu L. H. and Kan J. R., Ion leakage, ion reflection, ion heating and shock-front reformation in a simulated supercritical quasi-parallel collisionless shock, *Geophysical Research Letters*, vol. 17 №8, pages 1041-1044, July 1990
41. Masters, A., et al. (2008), Cassini encounters with hot flow anomaly-like phenomena at Saturn's bow shock, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L02202, doi:10.1029/2007GL032371.
42. Masters, A., et al. (2009), Hot flow anomalies at Saturn's bow shock, *J. Geophys. Res.*, 114, a08217, doi:10.1029/2009JA014112.
43. McFadden, J. P., Kortmann, O., Curtis, D., Dalton, G., Johnson, G., Abiad, R., et al. (2015). MAVEN SupraThermal and Thermal Ion Composition (STATIC) instrument. *Space Science Reviews*, 195(1-4), 199–256. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0175-6>
44. Michel, F. C., Solar wind interaction with planetary atmospheres, *Rev. Geophys.*, 9, 427- 435, 1971
45. Mitchell, D., Mazelle, C., Sauvaud, J.-A., Thocaven, J.-J., Rouzaud, J., Fedorov, A., Jakosky, B. M. (2016). The MAVEN solar wind electron analyzer. *Space Science Reviews*, 200(1–4), 495–528. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0232-1>
46. Omidi, N. and G. Sibeck, Formation of hot flow anomalies and solitary shocks, *J. Geophys. Res.*, Vol. 112, A01203, doi: 10.1029/2006JA011663, 2007a.
47. Omidi, N. (2007b). Formation of cavities in the foreshock, Turbulence and nonlinear processes in astrophysical plasmas (pp. 181–190). <https://doi.org/10.1063/1.2778962>
48. Omidi, N., J. P. Eastwood, and D. G. Sibeck (2010), Foreshock bubbles and their global magnetospheric impacts, *J. Geophys. Res.*, 115, A06204.
49. Omidi, N., D. Sibeck, X. Blanco-Cano, D. Rojas-Castillo, D. Turner, H. Zhang, and P. Kajdi_c (2013), Dynamics of the foreshock compressional boundary and its connection to foreshock cavities, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 823–831, doi:10.1002/jgra.50146.
50. Paschmann, G., G. Haerendel, N. Sckopke, E. Mobius, H. Lihr, C. W. Carlson, Three-Dimensional Plasma Structures with Anomalous Flow Directions near the Earth's Bow Shock, *J. Geophys. Res.*, Vol. 93, No. A10, Pages 11,279-11,294, October 1, 1988
51. Paschmann, G., Schwartz, S., Escoubet, C., & Haaland, S. (2005). *Outer magnetospheric boundaries: Cluster results*. Berlin: Springer.
52. Øieroset, M., D. L. Mitchell, T. D. Phan, R. P. Lin, and M. H. Acuña (2001), Hot diamagnetic cavities upstream of the Martian bow shock, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 887–890.
53. Ramstad, R., S. Barabash, Y. Futaana, H. Nilson, and M. Holmstrom (2017), Global Mars-solar wind coupling and ion escape, *J. Geophys., Res., Space Physics*, 122, 8051-8062, doi:10.1002/2017JA024306.

54. Riedler, W., Schwingenschuh, K., Lichtenegger, et al., Interaction of the solar wind with the planet Mars: Phobos-2 magnetic field observations, *Planet. Space Sci.*, 39(1-2), 75-81. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(91\)90129-X](https://doi.org/10.1016/0032-0633(91)90129-X)
55. Sauer, K., Bogdanov, A., & Baumgartel, K., (1994). Evidence of an ion composition boundary (protonopause) in bi-ion fluid simulation of solar wind mass loading. *Geophys. Res. Lett.*, 21(20), 2255-2258. <https://doi.1029/94GL01691>
56. Schwartz, S.J., Chaloner, C.P., Hall, D.S., Christiansen, P.J., Johnstones, A.D., 1985. An active current sheet in the solar wind ISSN0028–0836. *Nature* 318, 269–271.
57. Steven J . Schwartz, Ramona L . Kessel, Cassandra C. Brown, Les J. C. Woolliscroft , Malcolm W . Dunlop, Charles J . Farrugia, and David S. Hall, Active Current Sheets near the Earth's Bow Shock, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 93, No. A10, Pages 11,295-11,310, October 1, 1988
58. Schwartz, S. J. and D. Burgess (1991), Quasi-parallel shocks: A patchwork of three-dimensional structures, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 373–376.
59. Schwartz S.J., Paschmann G., Scokopke N., Bauer T.M., Dunlop M., Fazakerley A.N., Thomsen M. F., 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, 2000
60. Slavin, J. A., et al. (2009), MESSENGER and Venus Express observations of the solar wind interaction with Venus, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L09106, doi:10.1029/2009GL037876.
61. Sibeck D.G., Borodkova N.L., Zastenker G.N., Romanov S.A., Sauvaud J.-A., Gross deformation of the dayside magnetopause, *Geophys. Res. Lett.*, VOL.25, NO. 4, PP. 453-456, 1998
62. Sibeck D.G., Borodkova N.L., Schwartz S.J. et al., Comprehensive study of the magnetospheric response to a hot flow anomaly, *J. Geophys. Res.*, VOL.104, NO. A3, PP. 4577-4593, 1999
63. Sibeck, D. G., T. D. Phan, R. P. Lin, R. P. Lepping, and A. Szabo (2002), Wind observations of foreshock cavities: A case study, *J. Geophys. Res.*, 107, 1271.
64. Smith (2001), The heliospheric current sheet, *J. Geophys. Res.*, 106(A8), 15,819–15,831, doi: 10.1029/2000JA000120.
65. 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.
66. Thomsen M.F., Schwartz S. J. and Gosling J. T., observational evidence on the origin of ions upstream of the Earth's bow shock, *Journal of Geophysical Research*, vol. 88, №A10, pages 7843-7852, October 1, 1983

67. Thomsen, M. F., J. T. Gosling, S. J. Bame, K. B. Quest, C. T. Russell, and S. A. Fuselier (1988), On the origin of hot diamagnetic cavities near the Earth's bow shock, *J. Geophys. Res.*, 93, 11311–11325.
68. Thomas, V. A. and S.H. Brecht, Evolution of Diamagnetic Cavities in the Solar Wind, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 93, No. A10, Pages 11,341-11,353, October 1, 1988
69. Thomas V. A., Winske D., Thomsen M.F., Onsager T. G., Hybrid simulation of the formation of a hot flow anomaly, *J. Geophys. Res.*, VOL. 96, NO. A7, PP. 11,625-11,632, 1991
70. Thomsen, M. F., J. T. Gosling, S. A. Fuselier, S. J. Bame, and C. T. Russell (1986), Hot, diamagnetic cavities upstream from the Earth's bow shock, *J. Geophys. Res.*, 91, 2961–2973.
71. Tjulin, A., E. A. Lucek, and I. Dandouras (2009), Observations and modeling of particle dispersion signatures at a hot flow anomaly, *J. Geophys. Res.*, VOL. 114, A06208, doi:10.1029/2009JA014065
72. Trotignon, J. G., Mazelle, C., Bertucci, C., Acuna, M. H. (2006), Martian shock and magnetic pile-up boundary positions and shapes determined from the Phobos 2 and Mars Global Surveyor data sets, *Planetary and Space Science*, 54, 357-369, doi: 10.1016/j.pss.2006.01.003
73. Tsurutani, B. T., & Stone, R. G. (1985). Collisionless shocks in the heliosphere: Reviews of current research. Washington, DC: American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/GM035>
74. 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.
75. 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
76. Turner, D. L., N. Omid, D. G. Sibeck, and V. Angelopoulos (2013), First observations of foreshock bubbles upstream of Earth's bow shock: Characteristics and comparisons to HFAs, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 1552–1570, doi:10.1002/jgra.50198.
77. Turner, D. L., Wilson, L. B., Liu, T. Z., Cohen, I. J., Schwartz, S. J., Osmane, A., Fennell, J. F., Clemmons, J. H., Blake, J. B., Westlake, J., Mauk, B. H., Jaynes, A. N., Leonard, T., Baker, D. N., Strangeway, R. J., Russell, C. T., Gershman, D. J., Avakov, L., Giles, B. L., Torbert, R. B., Broll, J., Gomez, R. G., Fuselier, S. A., Burch, J. L. (2018), Autogenous and efficient acceleration of energetic ions upstream of Earth's bow shock, *Nature*, 561, 206-210, doi:10.1038/s41586-018-0472-9.

78. Uritsky, V. M., et al. (2014), Active current sheets and candidate hot flow anomalies upstream of Mercury's bow shock, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 853–876, doi:10.1002/2013JA019052.
79. Vaisberg, O. L., 1976. Mars-plasma environment. In: Williams, D.J. (Ed.), *Physics of the Solar Planetary Environment*. AGU, Boulder, pp. 854-871.
80. Vaisberg, O. L., *The Solar Wind Interaction with Mars: a Review of Results from Previous Soviet Missions to Mars*, *Adv. Space Res.*, Vol. 12, No. 9, 137-161, 1992.
81. Vaisberg, O. L., J. H. Waite, L. A. Avanov, V. N. Smirnov, D. L. Dempsey, J. L. Burch, and A. A. Skalsky (1999), HFA-like signatures observed with Interball-tail spacecraft, in *Proceeding of the Solar Wind 9 Conference*, vol. 471, edited by S. T. Suess, G. A. Gary, and S. F. Nerney, pp. 551–554, *Am. Inst. of Phys. Conf.*, College Park, Md.
82. Vaisberg, O.L., et al. (2016), Origin of the backstreaming ions in a young Hot Flow Anomaly, *Planetary and Space Science*, 131, 102-110, doi: 10.1016/j.pss.2016.08.003.
83. 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>
84. Valek, P. W., et al. (2017), Hot flow anomaly observed at Jupiter's bow shock, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 8107–8112, doi:10.1002/2017GL073175.
85. Wang, S., Q.-G. Zong, and H. Zhang (2013), Hot flow anomaly formation and evolution: Cluster observations, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 4360–4380, doi:10.1002/jgra.50424.
86. Xiao, T., et al. (2015), Propagation characteristics of young hot flow anomalies near the bow shock: Cluster observations, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 4142–4154, doi:10.1002/2015JA021013.
87. 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.
88. Zhang, H., D. G. Sibeck, Q.-G. Zong, S. P. Gary, J. P. McFadden, D. Larson, K.-H. Glassmeier, and V. Angelopoulos (2010), Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms observations of a series of hot flow anomaly events, *J. Geophys. Res.*, 115, A12235, doi:10.1029/2009JA015180.
89. Шестаков А. Ю., Вайсберг О. Л. // *Космические исследования*. - 2016. - Т. 54, № 2. - С. 85-103 DOI: 10.7868/S0023420616020060

Приложение 1. Формулы для расчёта моментов функции распределения по данным прибора CIS2/НИА.

f_{ijk} , - плотность частиц в пространстве скоростей

i - номер энергии

j – номера азимутального угла

k - номер полярного угла

$\Delta\theta$ и $\Delta\varphi$ - шаг сетки по полярному и азимутальному углу, соответственно

v_i^- и v_i^+ - соответственно нижняя и верхняя граница диапазона скоростей, приписываемого значению скорости v_i

V_{ijk} – фазовый объём, занимаемый ячейкой матрицы f_{ijk}

V' - фазовый объём, занимаемый анализируемым ансамблем

$$\begin{aligned} n_{ijk} &= \iiint_{V_{ijk}} f_{ijk} v^2 \cos \theta \, dv \, d\theta \, d\varphi = \\ &= f_{ijk} \left(\sin \left(\theta_k + \frac{\Delta\theta}{2} \right) - \sin \left(\theta_k - \frac{\Delta\theta}{2} \right) \right) \frac{(v_i + v_i^+)^3 - (v_i - v_i^-)^3}{3} \Delta\varphi \end{aligned} \quad (\text{п 1.1})$$

$$\begin{aligned} \langle v_x \rangle &= \iiint_{V'} v_x f(v_x, v_y, v_z) \, dv_x \, dv_y \, dv_z = \sum_{i j k} \iiint_{V_{ijk}} f_{ijk} r^3 \cos^2 \theta \cos^2 \varphi \, dv \, d\theta \, d\varphi = \\ &= \sum_{i j k} f_{ijk} \frac{(v_i + v_i^+)^4 - (v_i - v_i^-)^4}{4} \frac{1}{2} \cdot \\ &\cdot \left(\Delta\theta + \sin \left(\theta_k + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \cos \left(\theta_k + \frac{\Delta\theta}{2} \right) - \sin \left(\theta_k - \frac{\Delta\theta}{2} \right) \cos \left(\theta_k - \frac{\Delta\theta}{2} \right) \right) \cdot \\ &\cdot \left(\sin \left(\varphi_k + \frac{\Delta\varphi}{2} \right) - \sin \left(\varphi_k - \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \right) \end{aligned} \quad (\text{п 1.2})$$

$$\begin{aligned} \langle v_y \rangle &= \iiint_{V'} v_y f(v_x, v_y, v_z) \, dv_x \, dv_y \, dv_z = \sum_{i j k} \iiint_{V_{ijk}} f_{ijk} r^3 \cos^2 \theta \sin \varphi \, dv \, d\theta \, d\varphi = \\ &= \sum_{i j k} f_{ijk} \frac{(v_i + v_i^+)^4 - (v_i - v_i^-)^4}{4} \frac{1}{2} \cdot \\ &\cdot \left(\Delta\theta + \sin \left(\theta_k + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \cos \left(\theta_k + \frac{\Delta\theta}{2} \right) - \sin \left(\theta_k - \frac{\Delta\theta}{2} \right) \cos \left(\theta_k - \frac{\Delta\theta}{2} \right) \right) \cdot \\ &\cdot \left(\cos \left(\varphi_k - \frac{\Delta\varphi}{2} \right) - \cos \left(\varphi_k + \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \right) \end{aligned} \quad (\text{п 1.3})$$

$$\begin{aligned} \langle v_z \rangle &= \iiint_{V'} v_z f(v_x, v_y, v_z) dv_x dv_y dv_z = \sum_{i j k} \iiint_{V_{ijk}} f_{ijk} r^3 \cos \theta \sin \varphi dv d\theta d\varphi = \\ &= \sum_{i j k} f_{ijk} \frac{(v_i + v_i^+)^4 - (v_i - v_i^-)^4}{4} \frac{1}{2} \left(\cos \left(\theta_k - \frac{\Delta\theta}{2} \right)^2 - \cos \left(\theta_k + \frac{\Delta\theta}{2} \right)^2 \right) \Delta\varphi \end{aligned} \quad (\text{п 1.4})$$

Расчёт параллельной, перпендикулярной и средней скорости:

$$\langle v_{\parallel} \rangle = \frac{1}{N} \sum_i \sum_j \sum_k n_{ijk} v_i \cos \theta_{jk} \quad (\text{п 1.5})$$

$$\langle v_{\perp} \rangle = \frac{1}{N} \sum_i \sum_j \sum_k n_{ijk} v_i \sin \theta_{jk} \quad (\text{п 1.6})$$

$$\langle v_{total} \rangle = \sqrt{\langle v_{\parallel} \rangle^2 + \langle v_{\perp} \rangle^2} \quad (\text{п 1.7})$$

$$N = \sum_i \sum_j \sum_k n_{ijk} \quad (\text{п 1.8})$$

Расчёт параллельной и перпендикулярной температуры:

$$T_{\parallel} = \frac{m_p}{3kN} \sum_i \sum_j \sum_k n_{ijk} (v_i \cos \theta_{jk} - \langle v_{\parallel} \rangle)^2 \quad (\text{п 1.9})$$

$$T_{\perp} = \frac{m_p}{3kN} \sum_i \sum_j \sum_k n_{ijk} (v_i \sin \theta_{jk} - \langle v_{\perp} \rangle)^2 \quad (\text{п 1.10})$$

$$\theta_{jk} = \text{acos} \left(\frac{B_x \cos \theta_k \cos \varphi_j + B_y \cos \theta_k \sin \varphi_j + B_z \sin \theta_k}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}} \right) \quad (\text{п 1.11})$$

m_p - масса протона

k - постоянная Больцмана

Приложение 2. Список атрибутов событий АГП, рассмотренных в главе 3.

№	TimePre_start	TimePre_end	TimePost_start	TimePost_end	SWTime_start	SWTime_end
1	28.12.14 10:28	28.12.14 10:28	28.12.14 10:32	28.12.14 10:32	28.12.14 10:28	28.12.14 10:29
2	28.12.14 10:32	28.12.14 10:32	28.12.14 10:34	28.12.14 10:35	28.12.14 10:28	28.12.14 10:29
3	01.01.15 19:43	01.01.15 19:43	01.01.15 19:46	01.01.15 19:47	01.01.15 19:43	01.01.15 19:44
4	05.01.15 15:33	05.01.15 15:33	05.01.15 15:35	05.01.15 15:37	05.01.15 15:38	05.01.15 15:40
5	05.01.15 15:39	05.01.15 15:40	05.01.15 15:42	05.01.15 15:44	05.01.15 15:46	05.01.15 15:47
6	31.01.15 17:24	31.01.15 17:25	31.01.15 17:28	31.01.15 17:32	31.01.15 17:28	31.01.15 17:29
7	31.01.15 17:40	31.01.15 17:41	31.01.15 17:42	31.01.15 17:43	31.01.15 17:42	31.01.15 17:43
8	03.02.15 0:42	03.02.15 0:43	03.02.15 0:44	03.02.15 0:46	03.02.15 0:41	03.02.15 0:42
9	03.02.15 0:44	03.02.15 0:46	03.02.15 0:48	03.02.15 0:49	03.02.15 0:41	03.02.15 0:42
10	17.07.15 11:01	17.07.15 11:02	17.07.15 11:09	17.07.15 11:10	17.07.15 11:00	17.07.15 11:01
11	19.07.15 19:23	19.07.15 19:24	19.07.15 19:27	19.07.15 19:28	19.07.15 19:29	19.07.15 19:30
12	01.01.16 15:32	01.01.16 15:32	01.01.16 15:34	01.01.16 15:36	01.01.16 15:32	01.01.16 15:33
13	03.01.16 3:22	03.01.16 3:23	03.01.16 3:26	03.01.16 3:28	03.01.16 3:26	03.01.16 3:28
14	10.01.16 6:51	10.01.16 6:52	10.01.16 6:55	10.01.16 6:57	10.01.16 6:48	10.01.16 6:50
15	10.01.16 11:03	10.01.16 11:05	10.01.16 11:08	10.01.16 11:10	10.01.16 11:13	10.01.16 11:14
16	14.01.16 22:10	14.01.16 22:12	14.01.16 22:16	14.01.16 22:19	14.01.16 22:16	14.01.16 22:19
17	14.01.16 23:04	14.01.16 23:08	14.01.16 23:17	14.01.16 23:20	14.01.16 23:20	14.01.16 23:25
18	16.01.16 1:56	16.01.16 1:56	16.01.16 1:57	16.01.16 1:59	16.01.16 1:57	16.01.16 1:59
19	01.04.16 10:39	01.04.16 10:42	01.04.16 10:51	01.04.16 10:52	01.04.16 10:51	01.04.16 10:53

TimePre_start/TimePre_end – начало и конец временного интервала, по которому усреднялось ММП перед регистрацией события

TimePost_start/TimePost_end – начало и конец временного интервала, по которому усреднялось ММП после регистрации события

SWTime_start/ SWTime_end – начало и конец временного интервала, по которому усреднялись данные солнечного ветра при анализе данного события

№	Obs_time	X	Y	Z	Bx_pre	By_pre	Bz_pre	Bx_post	By_post	Bz_post	ϕ_B
1	100	1,43	0,89	-2,28	2,68	-3,41	0,88	4,87	-1,79	0,05	33,31
2	93	1,33	0,95	-2,29	4,87	-1,79	0,05	2,13	-3,74	1,82	44,98
3	112	1,71	0,60	-2,20	-3,12	-0,29	3,79	-3,43	1,80	2,87	27,40
4	78	1,54	0,68	-2,20	-1,69	1,48	0,76	-1,80	-1,97	0,25	87,09
5	117	1,39	0,80	-2,19	-2,00	-1,49	0,28	-2,14	1,11	0,88	63,53
6	148	1,17	-2,30	-0,68	-2,06	4,97	0,09	-4,03	-0,40	3,64	76,97
7	23	1,43	-2,17	-1,04	-3,77	3,52	0,68	-4,41	0,00	3,33	48,95
8	62	1,34	-2,24	-1,07	0,75	1,76	-0,54	-1,83	-0,59	0,78	133,57
9	51	1,37	-2,21	-1,11	-1,83	-0,59	0,78	-1,42	-0,15	1,35	23,61
10	30	1,04	2,16	1,04	-0,84	-0,90	-1,94	1,10	-0,98	-2,19	46,01
11	99	1,18	1,74	1,77	1,09	2,10	-1,57	-0,20	-1,44	1,40	161,64
12	55	0,59	1,54	1,10	0,83	0,02	1,37	0,86	1,14	1,01	40,73
13	80	0,73	2,06	0,65	2,91	3,93	-3,93	2,76	0,05	4,92	108,30
14	75	0,99	2,03	0,36	1,87	-0,53	-0,31	1,16	1,19	0,32	64,28
15	67	1,04	2,31	-0,21	1,83	-0,64	-0,10	1,81	-1,07	0,37	16,89
16	189	0,65	1,67	-2,15	-2,01	0,61	0,14	-1,86	-0,17	1,19	35,48
17	52	1,17	2,26	-0,91	-1,50	-0,65	1,41	0,50	2,09	-0,45	125,48
18	55	1,11	2,17	-1,36	-1,45	-0,27	-0,75	-0,85	0,48	-1,43	40,62
19	201	0,61	-0,60	-2,09	1,91	0,78	4,03	-1,31	3,36	3,17	53,64

Obs_time – продолжительность наблюдения события в секундах

X/Y/Z – место регистрации события в системе координат MSO в радиусах Марса

Bx_pre/ By_pre/ Bz_pre – усредненное ММП перед регистрацией события в нТ

Bx_post/ By_post/ Bz_post – усредненное ММП после регистрации события в нТ

ϕ_B – угол поворота вектора напряженности магнитного поля в токовом слое, связанным с событием, в градусах

№	θ_{Bn_pre}	θ_{Bn_post}	CSn x	CSn y	CSn z	θ_{nx}	Epre x	Epre y	Epre z
1	70,91	39,23	-0,11	-0,33	-0,94	96,34	-5,85E-05	-4,97E-04	-1,74E-03
2	39,50	84,17	-0,18	-0,51	-0,84	100,24	9,06E-07	-1,70E-05	-6,44E-04
3	28,96	32,44	-0,70	-0,37	-0,61	134,61	-3,23E-04	-2,18E-03	-4,30E-04
4	38,03	50,05	-0,29	0,15	-0,94	107,04	-1,77E-05	-3,16E-04	5,82E-04
5	37,25	28,27	-0,28	0,20	-0,94	106,41	7,48E-06	-1,46E-04	-7,14E-04
6	42,76	47,81	-0,64	-0,25	-0,73	129,47	3,80E-05	-2,62E-05	2,32E-03
7	19,54	38,83	-0,54	-0,44	-0,72	122,77	-1,21E-05	-2,99E-04	1,48E-03
8	86,84	40,74	-0,35	-0,14	-0,93	110,47	4,75E-05	1,79E-04	6,44E-04
9	40,30	41,21	-0,42	0,84	-0,35	114,91	-2,50E-05	-2,39E-04	-2,42E-04
10	49,17	87,07	-0,02	0,91	-0,41	90,94	3,34E-05	6,45E-04	-3,12E-04
11	66,23	84,54	-0,38	0,67	0,64	112,14	1,16E-04	8,22E-04	1,18E-03
12	46,86	35,11	-0,84	0,18	0,51	147,39	-3,30E-05	-4,69E-04	2,62E-05
13	54,36	55,19	-0,58	0,75	0,32	125,53	-1,21E-04	1,98E-03	1,89E-03
14	42,60	21,73	-0,07	0,32	-0,94	93,77	2,68E-06	1,23E-04	-1,93E-04
15	44,39	57,26	-0,28	-0,70	-0,66	106,36	6,49E-07	3,83E-05	-2,45E-04
16	39,74	20,16	-0,28	-0,79	-0,54	106,10	-3,05E-05	-1,31E-04	1,36E-04
17	33,26	52,34	-0,68	0,01	-0,73	133,16	-2,40E-05	-8,17E-04	-4,06E-04
18	42,86	82,08	-0,40	0,77	0,50	113,60	1,71E-05	3,88E-04	-1,73E-04
19	88,74	53,54	-0,63	-0,65	0,43	129,17	-1,86E-04	-1,60E-03	3,97E-04

$\theta_{Bn_pre}/\theta_{Bn_post}$ – угол между нормалью к ударной волне и направлением ММП в районе регистрации события в градусах

CSn x/ CSn y/ CSn z – вектор нормали к токовому слою в системе координат MSO

θ_{nx} – угол между вектором нормали к токовому слою и направлением на Солнце в градусах

Epre x/Epre y/Epre z – вектор напряженности межпланетного электрического поля перед регистрацией события в системе координат MSO в В/м

№	Epost x	Epost y	Epost z	EinwCS_pre	EinwCS_post	Vtr/Vg pre	Vtr/Vg post	Vsw
1	9,06E-07	-1,70E-05	-6,44E-04	нет	да	-0,16	-0,23	577
2	-1,30E-04	-1,03E-03	-1,97E-03	нет	да	-0,09	-0,06	577
3	-3,31E-04	-1,69E-03	6,69E-04	нет	да	0,62	0,56	548
4	-1,35E-05	-1,03E-04	-8,91E-04	да	да	-0,11	-0,09	427
5	-4,15E-05	-4,07E-04	4,11E-04	нет	нет	-0,14	-0,17	436
6	-3,52E-04	-1,81E-03	-5,89E-04	да	да	0,37	0,34	516
7	-2,72E-04	-1,64E-03	-3,59E-04	да	да	0,41	0,22	515
8	-2,50E-05	-2,39E-04	-2,42E-04	да	да	0,06	0,08	361
9	-2,37E-05	-4,55E-04	-7,54E-05	да	нет	0,68	0,66	361
10	3,83E-05	7,03E-04	-2,93E-04	нет	да	-0,23	-0,17	328
11	-9,44E-05	-7,48E-04	-7,85E-04	нет	нет	-0,05	-0,04	541
12	-2,78E-05	-3,47E-04	4,12E-04	да	да	0,54	0,68	345
13	-1,34E-04	-2,11E-03	9,50E-05	нет	нет	0,12	0,12	467
14	-1,54E-07	-1,40E-04	5,17E-04	нет	нет	0,02	0,03	421
15	-7,21E-06	-1,58E-04	-4,28E-04	нет	да	0,46	0,38	426
16	-1,03E-04	-6,77E-04	-2,55E-04	нет	да	0,36	0,67	530
17	1,85E-06	2,63E-04	1,22E-03	нет	нет	0,63	0,44	578
18	2,56E-05	7,52E-04	2,36E-04	нет	да	0,19	0,13	530
19	-1,92E-04	-1,30E-03	1,30E-03	нет	да	0,54	0,67	407

Epost x/Epost y/Epost z – вектор напряженности межпланетного электрического поля после регистрации события в системе координат MSO в В/м

EinwCS_pre/ EinwCS_post – вектор электрического поля до/после события направлен по в сторону токового слоя

|Vtr/Vg|pre/|Vtr/Vg|post – отношение скорости транзита токового слоя по фронту ударной волны к скорости гиродвижения ионов в межпланетном магнитном поле до/после регистрации события

Vsw – скорость солнечного ветра в момент регистрации события в км/с

№	t_exist	size Vtr	size nCS	BSDist	Vtr_x	Vtr_y	Vtr_z	Vtr
1	157	1,23	1,19	1,08	-14	-16	-36	42
2	78	1,78	1,77	0,95	-17	-34	-52	65
3	10	13,85	12,29	0,99	-130	-158	-366	419
4	59	2,93	2,90	0,77	-52	19	-114	127
5	55	4,89	4,83	0,65	-59	28	-126	142
6	16	14,15	12,72	0,52	-86	-156	-271	324
7	27	1,62	1,56	0,69	-75	-134	-182	239
8	46	1,90	1,89	0,58	-27	-18	-98	104
9	29	3,04	2,35	0,84	40	157	-121	202
10	248	0,19	0,19	0,80	-6	18	-11	22
11	34	7,24	7,22	0,72	-109	161	153	248
12	20	5,77	4,76	0,11	-143	167	280	356
13	29	6,47	6,38	0,13	-118	228	96	274
14	42	0,64	0,64	0,21	-1	9	-27	29
15	41	2,46	2,13	0,37	24	-70	-100	124
16	5	5,29	4,96	0,47	3	-68	-66	95
17	8	7,17	6,10	0,50	-113	118	-438	468
18	18	3,73	3,64	0,52	-47	200	104	230
19	2	18,11	13,08	0,13	-5	-301	53	305

t_exist – рассчитанное время жизни АГП к моменту регистрации события в секундах

size Vtr – рассчитанный размер АГП в направлении скорости транзита токового слоя вдоль фронта ударной волны в радиусах Марса

size nCS – рассчитанный размер АГП в направлении нормали к токовому слою в радиусах Марса

BSDist – расстояние от места регистрации события до фронта ударной волны

Vtr_x/Vtr_y/Vtr_z – скорость транзита токового слоя вдоль фронта ударной волны в системе координат MSO в км/с

|Vtr| - модуль скорости транзита токового слоя вдоль фронта ударной волны в км/с

№	X mse pre	Y mse pre	Z mse pre	X mse post	Y mse post	Z mse post
1	1,43	-1,48	1,94	1,43	-0,95	2,25
2	1,33	-1,01	2,26	1,33	-1,91	1,58
3	1,71	-2,27	-0,17	1,71	-1,83	-1,36
4	1,54	-0,45	-2,26	1,54	-0,93	2,11
5	1,39	-1,22	1,99	1,39	-0,98	-2,12
6	1,17	-2,32	-0,63	1,17	0,06	2,40
7	1,43	-2,33	-0,59	1,43	-0,56	2,34
8	1,34	-1,85	-1,64	1,34	0,83	2,33
9	1,37	0,78	2,35	1,37	-0,74	2,36
10	1,04	-1,87	1,49	1,04	-1,79	1,59
11	1,18	0,41	2,45	1,18	-0,03	-2,48
12	0,59	1,18	-1,48	0,59	1,89	-0,15
13	0,73	0,95	1,94	0,73	0,74	-2,03
14	0,99	-1,91	0,79	0,99	2,06	-0,19
15	1,04	-2,25	0,56	1,04	-2,24	-0,61
16	0,65	-0,32	-2,71	0,65	-2,60	-0,81
17	1,17	-1,82	-1,62	1,17	2,41	-0,41
18	1,11	0,36	2,54	1,11	1,95	1,67
19	0,61	-2,18	0,08	0,61	-1,91	-1,04

X mse pre/Y mse pre/Z mse pre – координаты спутника в момент регистрации события в системе координат MSE при использовании электрического поля перед регистрацией события, в радиусах Марса

X mse post/Y mse post/Z mse post - координаты спутника в момент регистрации события в системе координат MSE при использовании электрического поля после регистрации события, в радиусах Марса

Приложение 3. Список времен пересечений аппаратом MAVEN дневной магнитосферы Марса, использованный в главе 4.

№	Начало	Конец	Магнитопауза	Ионопауза	$\theta_E, ^\circ$	SZA, $^\circ$
1	27.07.19 0:08	27.07.19 0:32	0:21:30	0:24:00	29	90
2	27.07.19 3:41	27.07.19 4:12	3:57:30	4:07:30	18	83
3	27.07.19 7:23	27.07.19 7:50	7:37:00	7:40:00	4	83
4	27.07.19 14:39	27.07.19 15:08	14:54:00	15:01:00	35	80
5	27.07.19 18:18	27.07.19 18:48	18:34:00	18:40:00	33	82
6	27.07.19 21:59	27.07.19 22:28	22:15:00	22:24:00	7	87
7	28.07.19 1:32	28.07.19 2:06	1:54:00	2:02:00	83	87
8	28.07.19 5:11	28.07.19 5:42	5:32:30	5:40:00	-111	85
9	28.07.19 8:55	28.07.19 9:26	9:11:00	9:20:00	55	84
10	28.07.19 12:34	28.07.19 13:01	12:49:00	12:55:00	11	81
11	28.07.19 16:13	28.07.19 16:42	16:29:00	16:37:30	-93	83
12	28.07.19 19:44	28.07.19 20:17	20:10:00	20:15	-162	87
13	28.07.19 23:31	28.07.19 23:55	23:42:30	23:50	15	72
14	29.07.19 3:10	29.07.19 3:32	3:20	3:27	41	69
15	29.07.19 6:38	29.07.19 7:14	6:55	7:06	1	62
16	29.07.19 10:33	29.07.19 10:57	10:40	10:46:00	82	73
17	29.07.19 17:41	29.07.19 18:13	17:57	18:06	-149	70
18	29.07.19 21:25	29.07.19 21:50	21:37:30	21:45	-110	73
19	30.07.19 1:05	30.07.19 1:29	1:17:30	1:25	-107	74
20	30.07.19 4:47	30.07.19 5:11	4:55:00	5:06	76	71
21	30.07.19 8:23	30.07.19 8:51	8:37	8:40	27	77
22	30.07.19 11:58	30.07.19 12:27	12:16:00	12:21	88	77
23	30.07.19 19:18	30.07.19 19:36	19:27:30	19:32:00	-164	64
24	30.07.19 23:02	30.07.19 23:24	23:14:00	23:17:30	-91	78
25	31.07.19 2:41	31.07.19 3:03	2:52:30	3:00	1	77
26	31.07.19 6:20	31.07.19 6:46	6:32:00	6:35	8	78
27	31.07.19 10:04	31.07.19 10:15	10:09:00	10:14:30	26	73
28	31.07.19 13:35	31.07.19 14:02	13:47:30	13:55	45	72
29	31.07.19 17:15	31.07.19 17:43	17:32:30	17:40	-132	85
30	31.07.19 20:52	31.07.19 21:19	21:01:00	21:10	-92	63
31	01.08.19 0:34	01.08.19 0:54	0:43:40	0:47:30	-156	70
32	01.08.19 4:13	01.08.19 4:32	4:23:30	4:27:00	-151	71
33	01.08.19 7:54	01.08.19 8:16	8:04:15	8:07:30	-162	74
34	01.08.19 11:29	01.08.19 11:52	11:41	11:48	-150	70
35	01.08.19 15:12	01.08.19 15:34	15:20	15:27:30	-142	69
36	01.08.19 22:28	01.08.19 22:53	22:37:00	22:43	33	67
37	02.08.19 1:20	02.08.19 2:30	2:15:15	2:29:00	-93	65
38	02.08.19 2:08	02.08.19 2:32	2:17:30	2:25:00	-113	70
39	02.08.19 5:49	02.08.19 6:13	5:57:00	6:06:00	-153	70
40	02.08.19 9:20	02.08.19 9:53	9:32:30	9:42:00	-97	64
41	02.08.19 12:53	02.08.19 13:29	13:13:00	13:20:00	79	60

42	02.08.19 20:17	02.08.19 20:35	20:25:00	20:29:00	55	57
43	03.08.19 0:00	03.08.19 0:26	0:08:00	0:12:00	-93	62
44	03.08.19 3:39	03.08.19 4:05	3:47:30	3:55:00	-122	63
45	03.08.19 7:14	03.08.19 7:43	7:35:00	7:39:00	7	80
46	03.08.19 10:58	03.08.19 11:25	11:12:30	11:15:00	2	76
47	03.08.19 14:37	03.08.19 15:01	14:50:00	14:53:00	32	73
48	03.08.19 21:50	03.08.19 22:15	22:00	22:05:00	-108	59
49	04.08.19 1:34	04.08.19 1:56	1:45:00	1:50:00	-121	70
50	04.08.19 5:16	04.08.19 5:36	5:22:30	5:30:00	62	67
51	04.08.19 8:51	04.08.19 9:14	9:02:30	9:05:00	51	69
52	04.08.19 12:12	04.08.19 12:54	12:35:00	12:45	90	59
53	04.08.19 16:03	04.08.19 16:31	16:17:30	16:25:00	-98	64
54	04.08.19 19:36	04.08.19 20:12	19:51:00	20:00	-97	56
55	04.08.19 23:28	04.08.19 23:48	23:36	23:40	61	66
56	05.08.19 3:06	05.08.19 3:29	3:17:30	3:22:00	20	71
57	05.08.19 6:50	05.08.19 7:09	6:57:30	7:00:00	68	73
58	05.08.19 10:20	05.08.19 10:46	10:30:00	10:35	85	61
59	05.08.19 13:59	05.08.19 14:22	14:12:30	14:17:30	-154	68
60	05.08.19 17:39	05.08.19 18:04	17:51:00	18:00	8	67
61	05.08.19 21:12	05.08.19 21:42	21:24:30	21:36:00	17	58
62	06.08.19 0:56	06.08.19 1:20	1:06:00	1:07:30	-104	62
63	06.08.19 4:36	06.08.19 4:58	4:43:30	4:50	-123	60
64	06.08.19 8:10	06.08.19 8:38	8:17:30	8:30	-111	54
65	06.08.19 11:48	06.08.19 12:17	12:05	12:12:00	86	67
66	06.08.19 15:19	06.08.19 15:56	15:45	15:50	-98	69
67	06.08.19 22:44	06.08.19 23:08	22:54:30	23:01:00	-152	56
68	07.08.19 2:30	07.08.19 2:53	2:39	6:46	26	64
69	07.08.19 6:08	07.08.19 6:32	6:20:30	6:25:00	22	69
70	07.08.19 9:43	07.08.19 10:11	9:57:00	10:05:00	61	64
71	07.08.19 13:26	07.08.19 13:48	13:39:00	13:43:00	-173	71
72	07.08.19 17:05	07.08.19 17:29	17:16:00	17:18:00	12	67
73	07.08.19 20:38	07.08.19 21:04	20:50	20:56:00	65	59
74	08.08.19 4:03	08.08.19 4:22	4:12:30	4:17:30	-175	67
75	08.08.19 0:22	08.08.19 0:44	0:30:00	0:37:00	-176	61
76	09.08.19 1:48	09.08.19 2:16	1:59:40	2:10:00	-97	57
77	08.08.19 7:48	08.08.19 8:03	7:53:30	7:58:00	-132	71
78	08.08.19 11:24	08.08.19 11:42	11:31	11:35	-137	68
79	08.08.19 14:56	08.08.19 15:21	15:08:30	15:15	-179	66
80	08.08.19 18:36	08.08.19 19:00	18:47:30	18:53	-140	66
81	09.08.19 1:48	09.08.19 2:16	1:59:30	2:10:00	-97	57
82	09.08.19 5:33	09.08.19 5:55	5:44:30	5:50	-146	67
83	16.09.19 3:54	16.09.19 4:39	4:16:00	4:05:00	71	76
84	13.09.19 13:27	13.09.19 13:58	13:50	13:52	67	67
85	13.09.19 16:56	13.09.19 17:35	17:17	17:30	44	88
86	14.09.19 7:42	14.09.19 8:14	7:57:30	8:10:00	-150	74
87	14.09.19 11:28	14.09.19 11:54	11:38:00	11:48:00	37	69

88	15.09.19 2:07	15.09.19 2:25	2:15:45	2:20	15	57
89	15.09.19 5:44	15.09.19 6:04	5:51:00	6:00:00	89	64
90	16.09.19 7:07	16.09.19 7:30	7:17:30	7:27	-127	64
91	16.09.19 14:24	16.09.19 14:45	14:38	14:42	-167	54
92	16.09.19 18:02	16.09.19 18:23	18:12:30	18:17:30	5	62
93	16.09.19 21:14	16.09.19 22:02	21:37:30	21:55	-140	89
94	17.09.19 1:11	17.09.19 1:39	1:32:30	1:35:00	43	53
95	17.09.19 4:50	17.09.19 5:17	5:08:00	5:12:30	-120	59
96	17.09.19 8:31	17.09.19 8:56	8:43:00	8:51:00	-109	66
97	17.09.19 12:02	17.09.19 12:33	12:24:00	12:29:30	-101	59
98	17.09.19 15:39	17.09.19 16:10	15:55	16:06	63	76
99	17.09.19 16:59	17.09.19 17:38	17:25	17:32:30	-105	128
100	18.09.19 2:37	18.09.19 3:04	2:58:00	3:02	-169	55
101	18.09.19 6:21	18.09.19 6:43	6:30	6:37	-111	70
102	18.09.19 9:53	18.09.19 10:21	10:12:30	10:17:00	-138	59
103	18.09.19 13:18	18.09.19 14:02	13:43	13:56	-178	77
104	18.09.19 17:01	18.09.19 17:37	17:25	17:32:30	40	68
105	18.09.19 20:49	18.09.19 21:16	21:02:30	21:07	-168	69
106	19.09.19 0:25	19.09.19 0:53	0:43:00	0:50:00	36	63
107	19.09.19 4:05	19.09.19 4:32	4:13:00	4:27:30	84	82
108	19.09.19 7:43	19.09.19 8:10	7:53	8:02:30	47	78
109	19.09.19 11:15	19.09.19 11:48	11:37	11:40	51	63
110	19.09.19 14:42	19.09.19 15:26	15:10	15:22	17	76
111	19.09.19 18:30	19.09.19 19:03	18:46	18:55	42	80
112	19.09.19 22:09	19.09.19 22:42	22:27:30	22:37	17	72
113	20.09.19 1:52	21.09.19 2:17	2:02:00	2:15:00	-152	81
114	20.09.19 9:07	20.09.19 9:36	9:21:00	9:25	-132	74
115	30.09.19 8:33	30.09.19 9:05	8:50	9:00	-119	87

Начало – дата и время начала обозреваемого интервала

Конец – дата и время конца обозреваемого интервала

Магнитопауза – время пересечения спутником границы обтекающего потока и магнитосферы

Ионопауза – время пересечения спутником границы магнитосферы и ионосферы

θ_E – угол между проекциями векторов межпланетного электрического поля и радиуса-вектора космического аппарата на плоскость XU_{MSO} при прохождении магнитосферы

SZA – солнечно-зенитный угол космического аппарата при прохождении магнитосферы