

УДК 523.62-726

ОСОБЕННОСТИ ФОРШОК-ТРАНЗИЕНТОВ У ГОЛОВНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН ПЛАНЕТ

© 2023 г. С. Д. Шувалов*

Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия

**E-mail: shuvalovsergei@gmail.com*

Поступила в редакцию 19.09.2022 г.

После доработки 29.09.2022 г.

Принята к публикации 13.10.2022 г.

Перед головной ударной волной при квазипараллельной конфигурации межпланетного магнитного поля существует область, называемая форшоком, в которой протекает множество нестационарных процессов, наиболее крупномасштабные из которых носят собирательное название “форшок-транзиенты”. Размер данных образований может исчисляться десятками земных радиусов, что оказывает существенное влияние на характер обтекания магнитосферы солнечным ветром. Некоторые типы форшок-транзиентов наблюдаются и на других планетах, в том числе без собственного глобального магнитного поля, что говорит об универсальности данных явлений. В данной статье перечислены наиболее известные нестационарные процессы, протекающие в форшоке, а также приводятся актуальные представления о механизмах формирования наиболее крупных форшок-транзиентов.

Ключевые слова: солнечный ветер, головная ударная волна, форшок

DOI: 10.31857/S0320930X23020081, **EDN:** NWCAED

ВВЕДЕНИЕ

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 $\sim 13\text{--}15$ радиусов планеты и в хорошем приближении представляет собой поверхность второго порядка (Formisano, 1979; Lu и др., 2019), 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, Stone, 1985; Burgess, Scholer, 2015).

Ориентация вектора межпланетного магнитного поля играет ключевую роль в физике головной ударной волны. При квазиперпендикулярной геометрии, когда угол θ_{Bn} 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 квазипараллельной геометрии ($\theta_{Bn} < 45^\circ$) значительная часть ионов и электронов может дрейфовать от ударной волны вдоль вектора межпланетного 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 литерату-

ре называемые кавитонами форшока (“foreshock cavitons”, см., например, Blanco-Cano и др., 2009; данный термин не следует путать с полостями в форшоке, “foreshock cavities”, которым посвящен отдельный раздел данной статьи). 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, Burgess, 1991). Недавнее исследование (Chen и др., 2021) показало, что развитие SLAMS происходит из-за гирорезонанса между ионами солнечного ветра и распространяющимися им навстречу электромагнитными волнами. SLAMS у околоземной 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 следующие. (1) Пузыри в форшоке (“foreshock bubbles”, предсказаны моделированием в работе (Omid и др., 2010), и затем зарегистрированы на космическом аппарате 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., 1983; Paschmann и др., 1988), которые возникают в результате взаимодействия тангенциального разрыва в межпланетном магнитном поле с квазипараллельной 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.

ПУЗЫРИ В ФОРШОКЕ (“FORESHOCK BUBBLES”)

В работе (Omid 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, с 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 приведен результат гибридной симуляции пузыря в форшоке, находящегося вблизи подсолнечной точки Земли непосредственно перед его соприкосновением с головной ударной волной. В данной симуляции ориентация вектора магнитного поля поменялась на вращательном разрыве с $[1, 0, 0]$ на $[1, -5, 0]$ в координатах XYZ , что привело к образованию пузыря в форшоке (Turner и др., 2013). 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 сосредоточиваются 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.

На рис. 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 все большее количество частиц из форшока прибывает в область ядра. Повышенная концентрация надтепловой плазмы приводит к ее 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 обла-

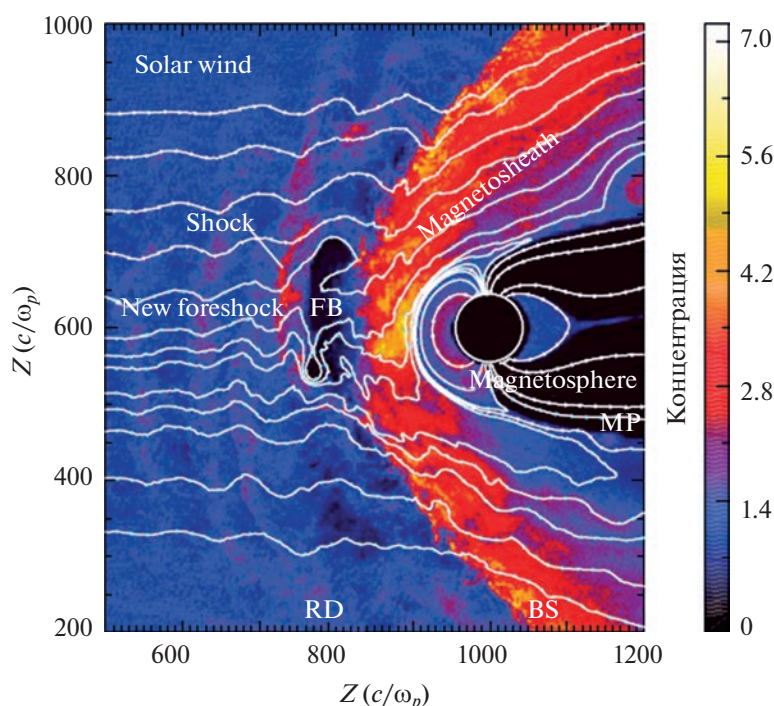


Рис. 1. Результат гибридного моделирования (Omidí и др., 2010) пузыря в форшоке, цветом обозначена концентрация протонов, нормированная по солнечному ветру, белыми линиями — силовые линии магнитного поля, FB — пузырь в форшоке, BS — ударная волна, MP — магнитопауза. Размерность осей X и Z представлена 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.

сти сжатия. Эта ударная волна также является частью структуры пузыря (см. рис. 1), и все образование начинает дрейфовать вместе с солнечным ветром приблизительно в антисолнечном направлении. На рис. 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 — зеленым. 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 ($J_{\text{out}} < J_{\text{in}}$). 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.

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 в области между пузырем и головной ударной волной. 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,двигающемся в анти-солнечном направлении, будет сначала регистрировать ядро, в котором присутствуют разнонаправленные потоки частиц с высокой температурой, пониженными 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, пониженные концентрация частиц и напряженность поля в ядре приводят к возникновению потоков магнитосферной плазмы, направленных к Солнцу, в то время как повышенные концен-

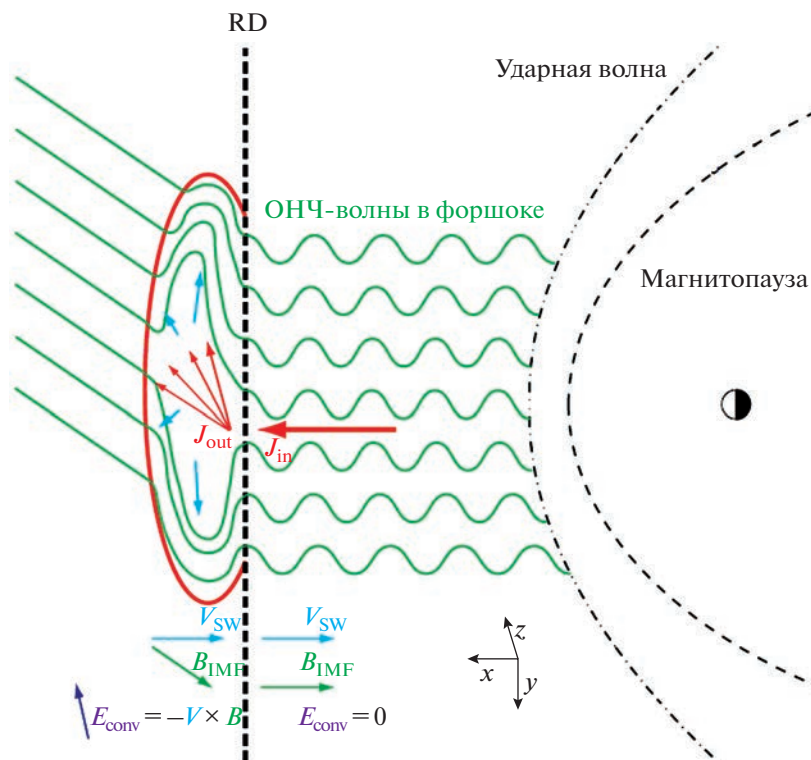


Рис. 2. Схематическое изображение сценария формирования пузыря в форшоке. E_{conv} и B_{IMF} — межпланетное электрическое и магнитное поля, соответственно, RD — вращательный разрыв, J_{in} и J_{out} — потоки частиц, входящих и выходящих из пузыря, соответственно (Turner и др., 2013).

трация 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 (Omidi 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 $\sim 5.6 E_{\text{SW}}$, 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 пузырем) посредством ускорения Ферми II рода.

АНОМАЛИИ ГОРЯЧЕГО ПОТОКА ("HOT FLOW ANOMALIES")

Аномалии горячего потока (или активные токовые слои (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 (Facsco и др., 2008). Эти сходства во многом объясняют причи-

ну, 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 ее 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 разветвления. В работе (Paschmann 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, 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 отраженных в месте пересечения ТС с квазиперпендикулярной ударной волной (рис. 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.

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 уменьшенными

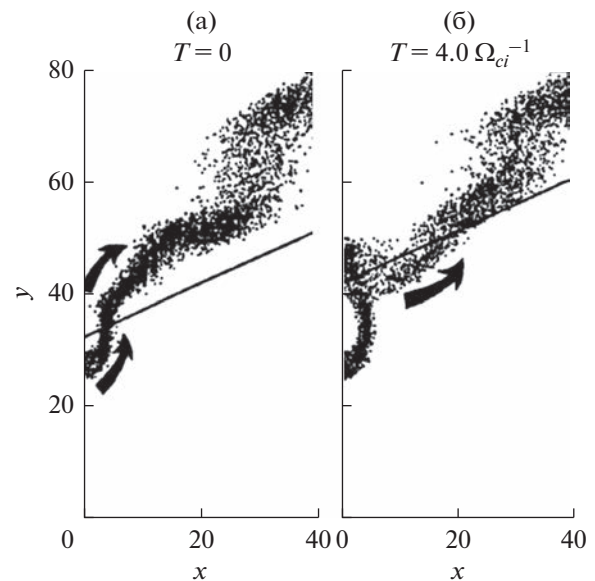


Рис. 3. Моделирование поведения частиц солнечного ветра, отраженных от ударной волны в моменты времени $T=0$ и $T=4\Omega_{ci}^{-1}$, где Ω_{ci} — циклотронная частота протонов в солнечном ветре — (а) и (б), соответственно. Единицы измерения осей указаны в c/ω_{pi} , где c — скорость света, ω_{pi} — плазменная ионная частота. Прямой линией обозначен ТС, точками — промоделированные ионы, распространяющиеся от ударной волны, стрелки указывают на направление их скоростей (Burgess, 1989).

напряженностью магнитного поля и плотностью частиц, из-за электромагнитной неустойчивости формируется пучок конечной ширины.

В глобальном гибридном моделировании, проведенном (Omid, Sibeck, 2007) выявлено, что аномалия горячего потока формируется, когда тангенциальный разрыв проходит через квазипараллельную 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 и др., 1982) для различных значений θ_{Bn} . Результаты показывают, что утечка ионов может происходить при угле θ_{Bn} , достигающем 65° при определенных условиях. Позже (Lyu, Kan, 1990) представили результаты симуляции для утечек ионов набегающего потока и отражений на квазипараллельной ударной волне, полученных с помощью одномерной гибридной модели. Результаты указывают на то, что доля частиц, образованная утечкой ионов, превалирует в областях с $\theta_{Bn} \sim 10^\circ$. (Thomsen и др., 1983) также показал, что частицы, утекшие из магнитослоя параллельно нормали к ударной волне, возвраща-

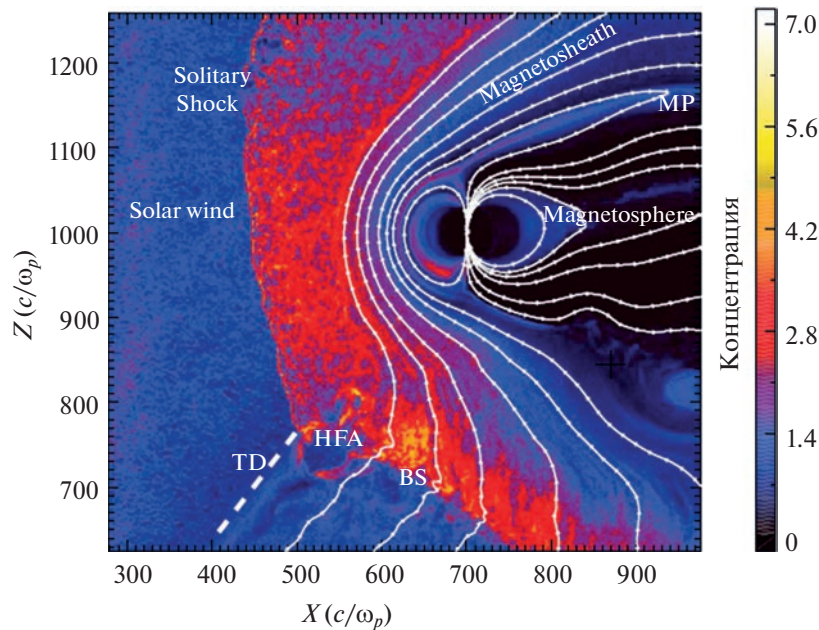


Рис. 4. Результат гибридного моделирования (Omidi, Sibeck, 2007) процесса формирования АГП (HFA). Обозначения те же, что и на рис. 1, за исключением тангенциального разрыва (TD) вместо вращательного (Turner и др., 2013).

ются к ней обратно для $\theta_{Bn} > 65^\circ$, но имеют недостаточную энергию для того, чтобы вновь ее пересечь.

В (Tjulin и др., 2009) приведен анализ распределения скоростей надтеплого диспергированного ионного пучка, наблюдаемого в АГП. В этой работе представлена модель формирования питч-углового и gyroфазового распределения частиц в предположении, что ТС является бесконечно тонким. В обсуждении представлены относительно жесткие ограничения, в которых данная модель может работать, включая ограничения на θ_{Bn} и близость космического аппарата к ударной волне.

На рис. 4 представлен результат гибридной симуляции (Omidi, Sibeck, 2007) полностью развитой АГП, которая сформировалась в процессе взаимодействия тангенциального разрыва с головной ударной волной Земли.

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; Omidi, 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:

Формирование АГП подразумевает пересечение разрывом в межпланетном магнитном поле фронта головной ударной волны, в то время как при формировании пузыря в форшоке это необязательно.

АГП могут формироваться как выше по направлению скорости солнечного ветра от разрыва (если прохождение разрыва изменяет ударную волну с квазиперпендикулярной на квазипараллельную), ниже разрыва (в обратном случае), так и внутри разрыва (если ударная волна квазипараллельна 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.

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.

Пузыри в форшоке дрейфуют вместе с направлением скорости солнечного ветра, в то время как

АГП распространяются вместе с линией пересечения разрыва и ударной волны.

Для формирования АГП необходимо, чтобы электрическое поле было направлено к разрыву с одной или двух сторон от него.

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.

Нормаль к ударной волне или области сжатия перед пузырем 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 группировки из четырех спутников Cluster, у каждой из которых наблюдались хорошо выделяемые области сжатия с обеих сторон от ядра. С использованием методов 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 ~70% случаев сумма теплового и магнитного давлений внутри АГП была больше давления в окружающем солнечном ветре для расширяющихся событий и меньше — для сужающихся.

Недавние наблюдения АГП у Земли спутниковой группировкой MMS (Magnetospheric Multiscale Mission) показали, что при определенных условиях в них может происходить ускорение частиц солнечного ветра с единиц кэВ до почти МэВ посредством механизма ускорения Ферми I рода (Turner и др., 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 (Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers) (Carlson и др., 1982), АГП широко изучались у Земли с помощью таких миссий, как ISEE (International Sun-Earth Explorer) (Thomsen и др., 1986), Interball (Vaisberg и др., 1999), Cluster (Facsko и др., 2009; Lucek и др., 2004), THEMIS (Time History of

Events and Macroscale Interactions during Substorms) (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 и др., 2017) и Сатурна (Masters и др., 2008; 2009), что доказывает универсальность данного явления.

На основании сравнения размеров АГП у Меркурия, Венеры, Земли, Марса¹ и Сатурна (Uritsky и др., 2014), было высказано 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 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 г. на Юпитере, оказалась настолько огромной (рис. 5), что ее размер составил ~15000 гирорадиусов, что в 5 раз превышает размер самых больших АГП, зарегистрированных на других планетах (~3000 гирорадиусов). Включение АГП, зарегистрированной на Юпитере, в статистику размеров этих явлений на разных планетах (рис. 5) позволило сделать вывод о том, что за их размер, скорее всего, отвечает масштаб соответствующей головной ударной волны.

Первая возможная регистрация АГП на Марсе описана в статье (Øieroset и др., 2001), по данным космического аппарата Mars Global Surveyor (Acuna и др., 1998; Albee и др., 2001). К сожалению, на аппарате отсутствовал ионный спектрометр, необходимый для однозначной идентификации данного явления. Только в ноябре 2014 г., когда космический аппарат MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution) (Jakosky и др., 2015) 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).

Формирование АГП вблизи планет без собственного глобального магнитного поля имеет особенности, связанные с малым расстоянием между планетой и ударной волной. Из-за того, что головная ударная волна Марса, к примеру, находится на порядок ближе к планете, чем земная, существуют предположения о том, что фор-

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

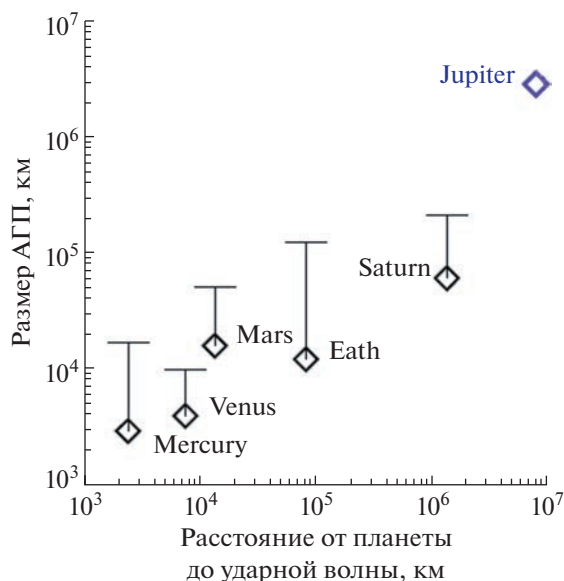


Рис. 5. Зависимость среднего размера АГП от расстояния между планетой и головной ударной волной для различных планет. Максимальные размеры АГП, зарегистрированных у каждой из планет, отмечены засечкой (Valek, 2017).

шок-транзиенты у Марса приводят к глобальным изменениям в плазменной оболочке планеты. Так, например, по оценке Collinson и др. (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.

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. 6). Полости в форшоке имеют размер около 30 земных радиусов (Lin, 2003; Omid, 2007; Turs и др., 2018), и продолжительность их регистрации околоземными спутниками составляет от 5 мин.

Данные образования формируются при радиальных условиях в межпланетном магнитном поле (когда силовые линии поля приблизительно параллельны вектору скорости солнечного ветра). В моделировании, проведенном Omid (2007), показано, что в этом случае в форшоке возникают два типа волн: (1) альвеновские волны, распространяющиеся вдоль магнитного поля и имею-

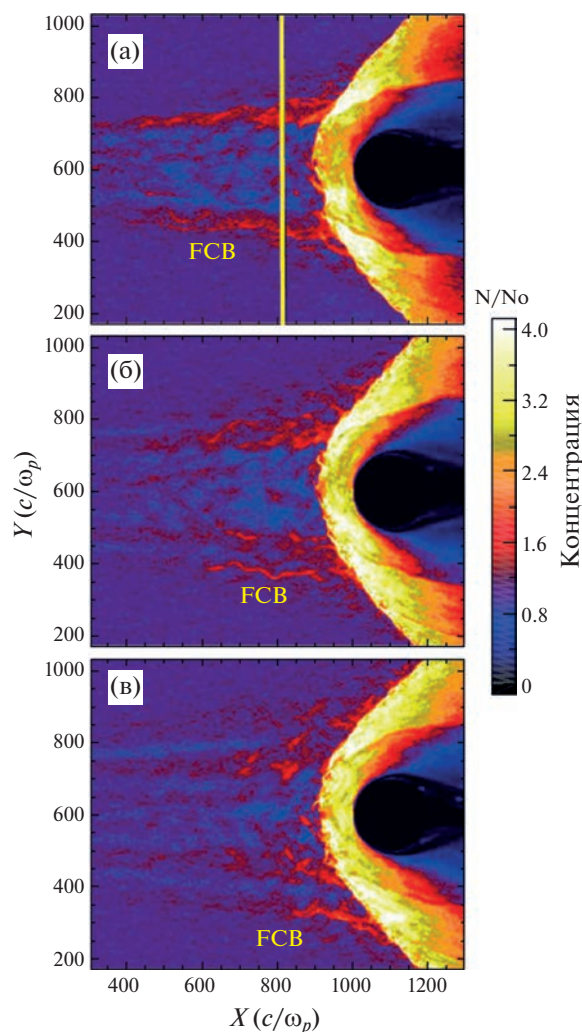


Рис. 6. Результат гибридного моделирования (Omid и др., 2013) формирования полости в форшоке у Земли, окруженной FCB. Цветом отмечена концентрация протонов, нормированная на концентрацию в солнечном ветре, на панелях (а), (б), (в) приведены моменты времени $100, 125$ и $150 \Omega_p^{-1}$, соответственно, где Ω_p^{-1} — циклотронная частота протонов в солнечном ветре.

щие 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 $\sim 50\%$ концентрация частиц, а также значительно меньшая по сравнению с окружающей средой напряженность магнитного поля. образо-

ванные 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перед квазипараллельной головной ударной волной находится турбулентная область, в которой происходит развитие множества плазменных неустойчивостей – форшок-транзиентов, ряд которых имеют масштабы десятков земных радиусов, что оказывает существенное влияние на процессы взаимодействия солнечного ветра с плазменной оболочкой планеты. Некоторые из этих неустойчивостей вызывают глобальную перестройку фронта ударной волны и приводят к увеличению высоты магнитопаузы, а в случае планет без собственного магнитного поля – и ионосферы. Физические процессы, приводящие к развитию форшок-транзиентов, очень различны.

Так, пузыри в форшоке формируются при радиальных условиях в межпланетном магнитном поле и наличии в нем вращательного разрыва. Развитие этих образований происходит из-за неустойчивости, вызванной взаимодействием отраженных протонов от ударной волны с набегающим потоком солнечного ветра через ОНЧ-волны, а также из-за того, что, при определенной геометрии вращательного разрыва, приток отраженных протонов в область ядра превосходит их отток.

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

Полости в форшоке формируются при радиальных условиях в межпланетном магнитном поле, и для их образования не требуется наличия в нем разрыва. При данной конфигурации поля в форшоке возникают два типа волн, локализованных в одном месте, взаимодействие которых приводит к образованию полостей, в которых наблюдается пониженная концентрация частиц, а также значительно меньшая по сравнению с окружающей средой напряженность магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Acuna M.H., Connerney J.E.P., Wasilewski P., Lin R.P., Anderson K.A., Carlson C.W., McFadden J., Curtis D.W., Mitchell D., Reme H., Mazelle C., Sauvaud J.A., d'Uston C., Cros A., Medale J.L., Siegfried J.B., Cloutier P., Mayhew M., Winterhalter D., Ness N.F.* Magnetic field and plasma observations at Mars: Initial results of the Mars Global Surveyor mission // *Science*. 1998. V. 279. P. 1676–1680. <https://doi.org/10.1126/science.279.5357.1676>
- Albee A.L., Arvidson R.E., Palluconi F., Thorpe T.* Overview of the Mars Global Surveyor mission // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. № E10. P. 23291–23316.
- Blanco-Cano X., Omid N., Russell C.T.* Global hybrid simulations: Foreshock waves and cavitons under radial IMF geometry // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. id. A01216. <https://doi.org/10.1029/2008JA013406>.
- Burgess D., Schwartz S.J.* Colliding plasma structures: Current sheet and perpendicular shock // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 11.327–11.340.
- Burgess D.* On the effect of a tangential discontinuity on ions specularly reflected at an oblique shock // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. № A1. P. 472–478.
- Burgess D., Scholer M.* Collisionless shocks in space plasmas: Structure and accelerated particles. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2015. 365 p.
- Carlson C.W., Curtis D.W., Paschmann G., Michel W.* An instrument for rapidly measuring plasma distribution functions with high resolution // *Adv. Space Res.* 1982. V. 2. № 7. P. 67–70. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(82\)90151-X](https://doi.org/10.1016/0273-1177(82)90151-X)
- Chen L.J., Wang S., Ng J., Bessho N., Tang J.M., Fung S.F., Le G., Gershman D., Giles B., Russel C.T., Torbert R., Burch J.* Solitary magnetic structures at quasi-parallel collisionless shocks: Formation // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. id. e2020GL090800. <https://doi.org/10.1029/2020GL090800>
- Collinson G.A., Sibeck D.G., Masters A., Shane N., Slavin J.A., Coates A.J., Zhang T.L., Sarantos M., Boardsen S., Moore T.E., Barabash S.* Hot flow anomalies at Venus // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. id. A04204. <https://doi.org/10.1029/2011JA017277>.
- Collinson G.A., Sibeck D.G., Masters A., Shane N., Zhang T.L., Fedorov A., Barabash S., Coates A.J., Moore T.E., Slavin J.A., Uritsky V.M., Boardsen S., Sarantos M.* A survey of hot flow anomalies at Venus // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2014. V. 119. P. 978–991. <https://doi.org/10.1002/2013JA018863>
- Collinson G., Halekas J., Grebowsky J., Connerney J., Mitchell D., Espley J., DiBraccio G., Mazelle C., Sauvaud J.A., Fedorov A., Jakosky B.* A hot flow anomaly at Mars // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 9121–9127. <https://doi.org/10.1002/2015GL065079>
- Edmiston J.P., Kennel C.F., Eichler D.* Escape of heated ions upstream of quasi-parallel shocks // *Geophys. Res. Lett.* 1982. V. 9. № 5. P. 531–534.
- Eastwood J.P., Lucek E.A., Mazelle C., Meziane K., Narita Y., Pickett J., Treumann R.A.* The foreshock // *Space. Sci. Rev.* 2005. V. 118. P. 41–94.
- Eastwood J.P., Sibeck D.G., Angelopoulos V., Phan T.D., Bale S.D., McFadden J.P., Cully C.M., Mendle S.B., Larson D., Frey S., Carlson C.W., Glassmeier K.-H., Auster H.U.,*

- Roux A., Le Contel O. THEMIS observations of a hot flow anomaly: Solar wind, magnetosheath, and ground-based measurements // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. id. L17S03.
<https://doi.org/10.1029/2008GL033475>.
- Facsko G., Kecskemety K., Erdos G., Tatallyay M., Daly P.W., Dandouras I. A statistical study of hot flow anomalies using Cluster data // *Adv. Space Res.* 2008. V. 41. P. 1286–1291.
- Facsko G., Nemeth Z., Erdos G., Kis A., Dandouras I. A global study of hot flow anomalies using Cluster multi-spacecraft measurements // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. № 5. P. 2057–2076.
<https://doi.org/10.5194/angeo-27-2057-2009>
- Formisano V. Orientation and shape of the Earth's bow shock in three dimensions // *Planet. and Space Sci.* 1979. V. 27. P. 1151–1161.
- Fuselier S.A. Ion distributions in the Earth's foreshock upstream from the bow shock // *Adv. Space Res.* 1995. V. 15. P. 43–52.
- Jakosky B.M., Lin R.P., Grebowsky J.M., Luhmann J.G., Mitchell D.F., Beutelschies G., Priser T., Acuna M., Andersson L., Baird D., Baker D., Bartlett R., Benna M., Bougher S., Brain D., et al. The Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) Mission // *Space Sci. Rev.* 2015. V. 195. P. 3–48.
<https://doi.org/10.1007/s11214-015-0139-x>
- Lin Y. Global-scale simulation of foreshock structures at the quasi-parallel bow shock // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № A11. P. 1390.
<https://doi.org/10.1029/2003JA009991>
- Lu J.Y., Zhou Y., Ma X., Wang M., Kabin K., Yuan H.Z. Earth's bow shock: A new three-dimensional asymmetric model with dipole tilt effects // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. V. 124. P. 5396–5407.
<https://doi.org/10.1029/2018JA026144>
- Lucek E.A., Horbury T.S., Balogh A., Dandouras I., Rème H. Cluster observations of hot flow anomalies // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. id. A06207.
<https://doi.org/10.1029/2003JA010016>
- Lyu L.H., Kan J.R. Ion leakage, ion reflection, ion heating and shock-front reformation in a simulated supercritical quasi-parallel collisionless shock // *Geophys. Res. Lett.* 1990. V. 17. № 8. P. 1041–1044.
- Masters A., Arridge C.S., Dougherty M.K., Berucci C., Billingham L., Schwartz S.J., Jackman C.M., Bebesi Z., Coates A.J., Thomsen M.F. Cassini encounters with hot flow anomaly-like phenomena at Saturn's bow shock // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. id. L02202.
<https://doi.org/10.1029/2007GL032371>
- Masters A., McAndrews H.J., Steinberg J.T., Thomsen M.F., Arridge C.S., Dougherty M.K., Billingham L., Schwartz S.J., Sergis N., Hospodarsky G.B., Coates A.J. Hot flow anomalies at Saturn's bow shock // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. id. A08217.
<https://doi.org/10.1029/2009JA014112>
- Omidi N. Formation of foreshock cavities // *Turbulence and Nonlinear Processes in Astrophysical Plasmas, AIP Conf. Proc.* 2007. V. 932. P. 181–190.
<https://doi.org/10.1063/1.2778962>
- Omidi N., Sibeck G. Formation of hot flow anomalies and solitary shocks // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. id. A01203.
<https://doi.org/10.1029/2006JA011663>
- Omidi N., Eastwood J.P., Sibeck D.G. Foreshock bubbles and their global magnetospheric impacts // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. id. A06204.
- Omidi N., Sibeck D., Blanco-Cano X., Rojas-Castillo D., Turner D., Zhang H., Kajdič P. Dynamics of the foreshock compressional boundary and its connection to foreshock cavities // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. V. 118. P. 823–831.
<https://doi.org/10.1002/jgra.50146>
- Omidi N., Lee S.H., Sibeck D.G. Ion acceleration by foreshock bubbles // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021. V. 126. № 5. id. e2020JA028924.
<https://doi.org/10.1029/2020JA028924>
- Paschmann G., Haerendel G., Sckopke N., Mobius E., Lühr H., Carlson C.W. Three-dimensional plasma structures with anomalous flow directions near the Earth's bow shock // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. № A10. P. 11279–11294.
- Paschmann G., Schwartz S., Escoubet C.P., Haaland S. Outer magnetospheric boundaries: Cluster results. Berlin: Springer, 2005.
- Øieroset M., Mitchell D.L., Phan T.D., Lin R.P., Acuña M.H. Hot diamagnetic cavities upstream of the Martian bow shock // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 887–890.
- Schwartz S.J., Chaloner C.P., Hall D.S., Christiansen P.J., Johnstones A.D. An active current sheet in the solar wind // *Nature.* 1985. V. 318. P. 269–271.
- Schwartz S.J., Kessel R.L., Brown C.C., Woolliscroft J.C., Dunlop M.W., Farrugia C.J., Hall D.S. Active current sheets near the Earth's bow shock // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. № A10. P. 11295–11310.
- Schwartz S.J., Burgess D. Quasi-parallel shocks: A patchwork of three-dimensional structures // *Geophys. Res. Lett.* 1991. V. 18. P. 373–376.
- Schwartz S.J. Hot flow anomalies near the Earth's bow shock // *Adv. Space Res.* 1995. V. 15. № 8–9. P. 107–116.
[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(94\)00092-F](https://doi.org/10.1016/0273-1177(94)00092-F)
- Sibeck D.G., Phan T.D., Lin R.P., Lepping R.P., Szabo A. Wind observations of foreshock cavities: A case study // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. 1271.
- Slavin J.A., Acuna M.H., Anderson B.J., Barabash S., Benna M., Boardsen S.A., Fraenz M., Gloecker G., Gold R.E., Ho G.C., Korth H., Krimigis S.M., McNutt R.L., Raines J.M., Sarantos M., Solomon S.C., Zhang T., Zurbuchen T.H. MESSENGER and Venus Express observations of the solar wind interaction with Venus // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. id. L09106.
<https://doi.org/10.1029/2009GL037876>
- Thomas V.A., Brecht S.H. Evolution of diamagnetic cavities in the solar wind // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. № A10. P. 11,341–11,353.
- Thomsen M.F., Schwartz S.J., Gosling J.T. Observational evidence on the origin of ions upstream of the Earth's bow shock // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88. № A10. P. 7843–7852.
- Thomsen M.F., Gosling J.T., Fuselier S.A., Bame S.J., Russell C.T. Hot, diamagnetic cavities upstream from the Earth's bow shock // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. 2961–2973.

- Thomsen M.F., Gosling J.T., Bame S.J., Quest K.B., Russell C.T., Fuselier S.A. On the origin of hot diamagnetic cavities near the Earth's bow shock // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 11311–11325.
- Tjulin A., Lucek E.A., Dandouras I. Observations and modeling of particle dispersion signatures at a hot flow anomaly // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. id. A06208. <https://doi.org/10.1029/2009JA014065>.
- Tsurutani B.T., Stone R.G. Collisionless shocks in the heliosphere: Reviews of current research // *Geophys. Monograph*, Washington: Am. Geophys. Union. 1985. <https://doi.org/10.1029/GM035>.
- Turc L., Ganse U., Pfau-Kempf Y., Hoilijoki S., Battarbee M., Juusola L., Jarvinen R., Brito T., Grandin M., Palmroth M. Foreshock properties at typical and enhanced interplanetary magnetic field strengths: results from hybrid-Vlasov simulations // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018. V. 123. P. 5476–5493. <https://doi.org/10.1029/2018JA025466>
- Turner D.L., Omid N., Sibeck D.G., Angelopoulos V. First observations of foreshock bubbles upstream of Earth's bow shock: Characteristics and comparisons to HFAs // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. V. 118. P. 1552–1570. <https://doi.org/10.1002/jgra.50198>
- 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. et al. Autogenous and efficient acceleration of energetic ions upstream of Earth's bow shock // *Nature*. 2018. V. 561. P. 206–210. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0472-9>
- Uritsky V.M., Slavin J.A., Boardsen S.A., Sundberg T., Raines J.M., Gershman D.J., Collinson G., Sibeck D., Khazanov G.V., Anderson B.J., Korth H. Active current sheets and candidate hot flow anomalies upstream of Mercury's bow shock // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. V. 119. P. 853–876. <https://doi.org/10.1002/2013JA019052>
- Vaisberg O.L., Waite J.H., Avakov L.A., Smirnov V.N., Dempsey D.L., Burch J.L., Skalsky A.A. HFA-like signatures observed with Interball-tail spacecraft // *Proc. Solar Wind 9 Conf.* 1999. V. 471. P. 551–554. Am. Inst. of Phys. Conf., College Park, Md.
- Valek P.W., Thomsen M.F., Allegrini F., Bagenal F., Bolton S., Connerney J., Ebert R.W., Gladstone R., Kurth W.S., Levin S., Louarn P., Mauk B., McComas D.J., Pollock C., Reno M., Szalay J.R., Weidner S., Wilson R.J. Hot flow anomaly observed at Jupiter's bow shock // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44. P. 8107–8112. <https://doi.org/10.1002/2017GL073175>
- Xiao T., Zhang H., Shi Q.Q., Zong Q.-G., Fu S.U., Tian A.M., Sun W.J., Wang S., Parks G.K., Yao S.T., Reme H., Dandouras I. Propagation characteristics of young hot flow anomalies near the bow shock: Cluster observations // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. V. 120. P. 4142–4154. <https://doi.org/10.1002/2015JA021013>
- Zhang H., Sibeck D.G., Zong Q.-G., Gary S.P., McFadden J.P., Larson D., Glassmeier K.-H., Angelopoulos V. Time history of events and macroscale interactions during substorms observations of a series of hot flow anomaly events // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. id. A12235. <https://doi.org/10.1029/2009JA015180>.