

## СРАВНЕНИЕ МАГНИТНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ОВЕРШУТОВ МЕЖПЛАНЕТНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН

© 2020 г. Н. Л. Бородкова<sup>1</sup>, \*, О. В. Сапунова<sup>1</sup>, В. Г. Еселевич<sup>2</sup>,  
Г. Н. Застенкер<sup>1</sup>, Ю. И. Ермолаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

\*nlbor@mail.ru

Поступила в редакцию 28.02.2020 г.

После доработки 15.03.2020 г.

Принята к публикации 29.05.2020 г.

По данным плазменного спектрометра БМСВ, установленного на КА *СПЕКТР-Р*, дополненных измерениями магнитного поля на КА *WIND*, исследовалась структура фронтов межпланетных ударных волн. Особое внимание было уделено периодическим повышением (овершутам) в величине потока ионов или магнитного поля относительно их средних значений за рампом. Проведено сравнение с величиной овершута в магнитном поле, числом Маха и параметром бета. На основании анализа 18 пересечений фронтов межпланетных ударных волн, в которых наблюдались овершуты в величине потока ионов и магнитного поля, было показано, что величина овершута магнитного поля, в среднем, меньше аналогичной величины в потоке ионов солнечного ветра, что связано с различным временным разрешением измерений. Получено, что величина овершута потока ионов возрастает с ростом числа Маха так же, как и величина овершута магнитного поля. Показано, что овершуты образуются не только у сверхкритических ударных волн, но и у тех, у которых числа Маха меньше значения первого критического числа Маха. Получено также, что оценки длины волны колебаний потока ионов и магнитного поля за рампом хорошо коррелируют с величиной гирорадиуса захваченных ионов.

DOI: 10.31857/S0023420620060011

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования существования в разреженной плазме бесстолкновительных ударных волн показали, что причиной формирования фронта бесстолкновительной ударной волны могут быть коллективные процессы, связанные с развитием какого-то типа неустойчивости. В результате эффективная длина пробега заряженных частиц резко уменьшается до масштаба, на котором может происходить эффективная диссипация энергии в бесстолкновительном ударном фронте [1–3]. Этим масштабом является фронт ударной волны. Наиболее важными параметрами, определяющими структуру фронта ударной волны, являются магнитозвуковое число Маха  $M_{MS}$ , угол  $\theta_{BN}$  между направлением вектора магнитного поля перед фронтом и нормалью к фронту волны и параметр бета  $\beta$  – отношение газового давления к магнитному [4, 5].

В настоящее время наиболее подробно изучена структура ударного фронта квазиперпендикулярных магнитозвуковых ударных волн [6–10]. В структуре фронта квазиперпендикулярной удар-

ной волны по измерениям магнитного поля выделяются, как правило, области подножия, рампа и овершута [5]. Кроме того, перед рампом и за ним могут образовываться быстрые магнитозвуковые или вистлеровские волны [см., например, 6, 11, 12, 13].

Рамп представляет собой тонкий переходный слой от невозмущенного к возмущенному солнечному ветру, в котором происходит перераспределение энергии направленного движения плазмы в тепловую энергию и ускорение частиц до высоких энергий на масштабах, порядка нескольких значений ионной инерциальной длины [см., например, 11, 14–19]. При увеличении числа Маха и приближении его к значению первого критического числа Маха  $M_{C1}$ , в структуре магнитного поля перед рампом возникает подножие. Одновременно, непосредственно за фронтом начинают регистрироваться периодические повышения (овершуты) и провалы (андершуты) в величине магнитного поля относительно среднего значения поля за ударным фронтом [см., например, 20–24]. Овершут-андершут структуру формируют две популяции ионов солнечного вет-

ра: ускоренные на ударном фронте и пучки ионов, прошедших рампы после отражения [22, 24, 25].

Первые результаты детального исследования поведения овершута были приведены в работе [23]. На основании анализа 110 пересечений квазиперпендикулярной околоземной ударной волны было получено, что амплитуда овершута (отношение разницы между максимальным значением величины магнитного поля непосредственно за рампом и средним устоявшемся значением магнитного поля за рампом) возрастает с ростом числа Маха и параметра бета. Наблюдавшееся резкое возрастание амплитуды овершута при приближении к первому критическому числу Маха позволило сделать вывод о существенной роли отраженных ионов в формировании фронта сверхкритической ударной волны. Эдмистон и Кеннелл [26] предположили, что такое отражение должно встречаться только на фронтах квазиперпендикулярных ударных волн с числами Маха, большими, чем первое критическое число Маха. Было показано, что овершуты существуют и в структуре ударных волн других планет и величина овершута также возрастает при увеличении параметра бета и числа Маха [25].

Конфигурация перпендикулярной ударной волны исследовалась методами гибридного моделирования [22]. Было получено, что квазистационарные структуры за ударным фронтом связаны с образованием популяции отраженных и нагретых ионов. Также было показано, что результаты моделирования хорошо согласуются с рядом наблюдательных особенностей квазиперпендикулярных ударных волн, включая морфологию потока отраженных ионов, поведение профиля магнитного поля на всем протяжении скачка и зависимость величины овершута магнитного поля от числа Маха.

Так как за фронтом ударной волны усиливается турбулентность в области низких частот, то она может вносить свой вклад в значение величины овершута. В работе [27] было проведено исследование возможного вклада турбулентности в значение величины овершута. Разница в значениях величины овершуты, определенных с разными временными разрешениями была приписана влиянию турбулентности в области частот, больших, чем ионная циклотронная частота. Кроме того, в работе было показано, что овершуты образуются не только у сверхкритических ударных волн, но и у тех, у которых числа Маха приближаются к значению первого критического числа Маха. Этот же вывод был сделан в работе [28] на основе исследования пересечений Марсианской ударной волны.

Впервые измерения плотности электронов солнечного ветра с временным разрешением 250 мс в области овершута — андершута за фронтом 56 пересечений околоземной волны по дан-

ном КА *Кластер* были приведены в работах [8, 29]. Было показано, что огибающая абсолютных значений колебаний плотности в большинстве случаев затухает экспоненциально. Получено также, что оценка длины затухания колебаний хорошо коррелирует с величиной гирорадиуса захваченных ионов и не коррелирует со значением ионной инерционной длины.

К настоящему времени собрано много экспериментальных данных о структуре фронта ударной волны, в том числе и овершуты (например, см. [9, 17, 24, 30, 31]). Показано, что фронт ударной волны с числом Маха, превышающим значение первого критического числа Маха, может быть нестационарным. На ударном фронте могут возникать неоднородности, причиной которых могут быть магнитные структуры, расположенные перед рампом и конвектируемые внутрь рампа [32]. Первые прямые измерения по данным КА *Кластер* нестационарности фронта ударной волны показали, что переход к нестационарности происходит внутри рампа на электронных масштабах [33].

К настоящему времени временное разрешение плазменных экспериментов почти сравнялось с временным разрешением магнитных экспериментов. И это позволяет исследовать структуру фронта ударной волны не только по измерениям магнитного поля, но и по измерениям параметров плазмы солнечного ветра с высоким временным разрешением. Целью данной работы является изучение поведения потока ионов солнечного ветра в области овершута, определение длины волны колебаний потока ионов и магнитного поля за овершутом в зависимости от характеристик ударной волны.

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

### 2.1. Данные

Для исследования тонкой структуры фронта ударной волны использовались данные, полученные с помощью прибора БМСВ. Прибор БМСВ представляет собой спектрометр плазмы для измерения энергетического спектра ионов в диапазоне 0.2–2.8 кэВ/заряд, а также вектора полного потока ионов, переносной скорости (в диапазоне от 200 до 750 км/с), ионной изотропной температуры (от 1 до 100 эВ) и концентрации (от 1 до 100 см<sup>-3</sup>).

Прибор БМСВ был разработан специально для достижения наиболее высокого временного разрешения в определении параметров плазмы солнечного ветра. Величина и направление полного вектора потока ионов солнечного ветра измерялись с частотой 32 Гц. Гидродинамические параметры плазмы солнечного ветра могли определяться с временным разрешением 1 с, или 0.031 с. Детальное описание приведено в работах [18, 34, 35].

Для анализа поведения межпланетного магнитного поля вблизи фронта ударных волн использовались данные с временным разрешением 0.092 с, полученные с помощью прибора MFI на КА *WIND*, расположенном, как правило, в солнечном ветре около первой точки либрации [36]. Кроме того, для сравнения поведения плазмы солнечного ветра в разных точках пространства, использовались данные, полученные с помощью приборов SWE и 3DP с временным разрешением 92 с и 3 с, соответственно.

## 2.2. Методы определения нормали к фронту МУВ и скорости $V_{SH}$ фронта

Одним из основных параметров, характеризующих тип фронта МУВ, является угол  $\theta_{BN}$  между нормалью к фронту волны и направлением вектора магнитного поля. Для определения угла  $\theta_{BN}$  необходимо знать направление нормали к фронту ударной волны. В работе использовался геометрический метод для определения нормали и скорости ударной волны  $V_{SH}$ . Для реализации геометрического метода необходимо наличие в солнечном ветре одновременно как минимум четырех КА. Как правило, в солнечном ветре одновременно с КА *СПЕКТР-Р* находились спутники *SOHO*, *WIND*, *ACE*, *THEMIS-B* и *THEMIS-C*. Кроме того, периодически в солнечный ветер выходили спутники *Cluster* и *Geotail*. Зная координаты положения спутников в моменты прохождения через них фронта МУВ и времена регистрации ударного фронта приборами этих спутников, и, в предположении, что фронт ударной волны является плоским, были определены скорость и направление движения фронта ударной волны для всех событий, зарегистрированных на КА *СПЕКТР-Р*.

## 3. ПРИМЕРЫ НАБЛЮДЕНИЯ ОВЕРШУТА ЗА ФРОНТОМ МУВ ПО ДАННЫМ КА *СПЕКТР-Р*

Основные структурные особенности фронта ударной волны, связанные с различными по своей природе коллективными процессами, определяются и исследуются обычно по временным или пространственным зависимостям модуля магнитного поля  $B$ , так как эксперименты по измерению магнитного поля давно имеют высокое временное разрешение.

Пример поведения параметров плазмы и магнитного поля на фронте межпланетной ударной волны, зарегистрированной 23.IV.2012, приведен на рис. 1.

На рис. 1 показаны временные профили скорости, плотности, температуры протонов и потока ионов солнечного ветра, зарегистрированные

на КА *СПЕКТР-Р* (панели а–г) и профили магнитного поля, зарегистрированные на КА *Cluster 2* (панели д–е) и *WIND* (панели ж–з). Временное разрешение измерений параметров плазмы – скорости, плотности и температуры протонов солнечного ветра в данном случае невелико и составляет 1 с, в то время как измерения потока ионов солнечного ветра имеют временное разрешение 0.031 с. Временное разрешение измерений магнитного поля на КА *Cluster 2* и *WIND* составляет 0.045 и 0.091 с, соответственно.

Координаты КА *СПЕКТР-Р* в системе координат GSE в это время были  $X = 0.33 R_E$ ,  $Y = 30.65 R_E$ ,  $Z = -10.89 R_E$ , координаты КА *Cluster 2* были  $X = 9.89 R_E$ ,  $Y = -14.80 R_E$ ,  $Z = -10.83 R_E$ , а КА *WIND* находился в точке с координатами  $X = 260.15 R_E$ ,  $Y = 31.90 R_E$ ,  $Z = 21.54 R_E$ . Для сопоставления измерений магнитного поля и потока ионов солнечного ветра, относящихся к одному событию, но выполненных на разных спутниках, значения магнитного поля сдвигались по временной шкале таким образом, чтобы времена начала регистрации рампа фронта волны по магнитным измерениям и потоку ионов совпали. Данные измерений на КА *Cluster 2* были сдвинуты на 21.5 с, а данные измерений на КА *WIND* – на 3941 с для совмещения с данными измерений на КА *СПЕКТР-Р*.

Принимая во внимание расстояние между спутниками, участки ударного фронта и связанные с ними структуры, наблюдаемые на *WIND*, *Cluster* и *СПЕКТР-Р*, могут быть не идентичны. С одной стороны, в солнечном ветре могут возникать колебания магнитного поля и плазмы. В работе [37] было показано, что предположение о том, что флуктуации межпланетного магнитного поля в заморожены от точки Лагранжа L1 до магнитосферы Земли, справедливо для медленного солнечного ветра. Таким образом, наличие флуктуаций магнитного поля в медленном солнечном ветре мало влияет на его квазистационарную структуру. В то же время известно, что межпланетные ударные волны обычно распространяются в медленном солнечном ветре, который имеет колебания плотности. Авторы работы [38] исследовали пространственно-временную корреляцию турбулентности плазмы в солнечном ветре и обнаружили, что для медленного солнечного ветра корреляция сохраняется на больших временных масштабах. Кроме того, вдоль фронта могут существовать неоднородности, а сам фронт может иметь волнистую поверхность. В таком случае структуры, связанные с участками ударного фронта, измеренными на *WIND*, *Cluster 2* и *СПЕКТР-Р*, могут заметно отличаться друг от друга. Согласно [39], пространственный масштаб, на котором солнечный ветер можно считать однородным по плотности вдоль фронта ударной волны в плоскости эклиптики, составля-

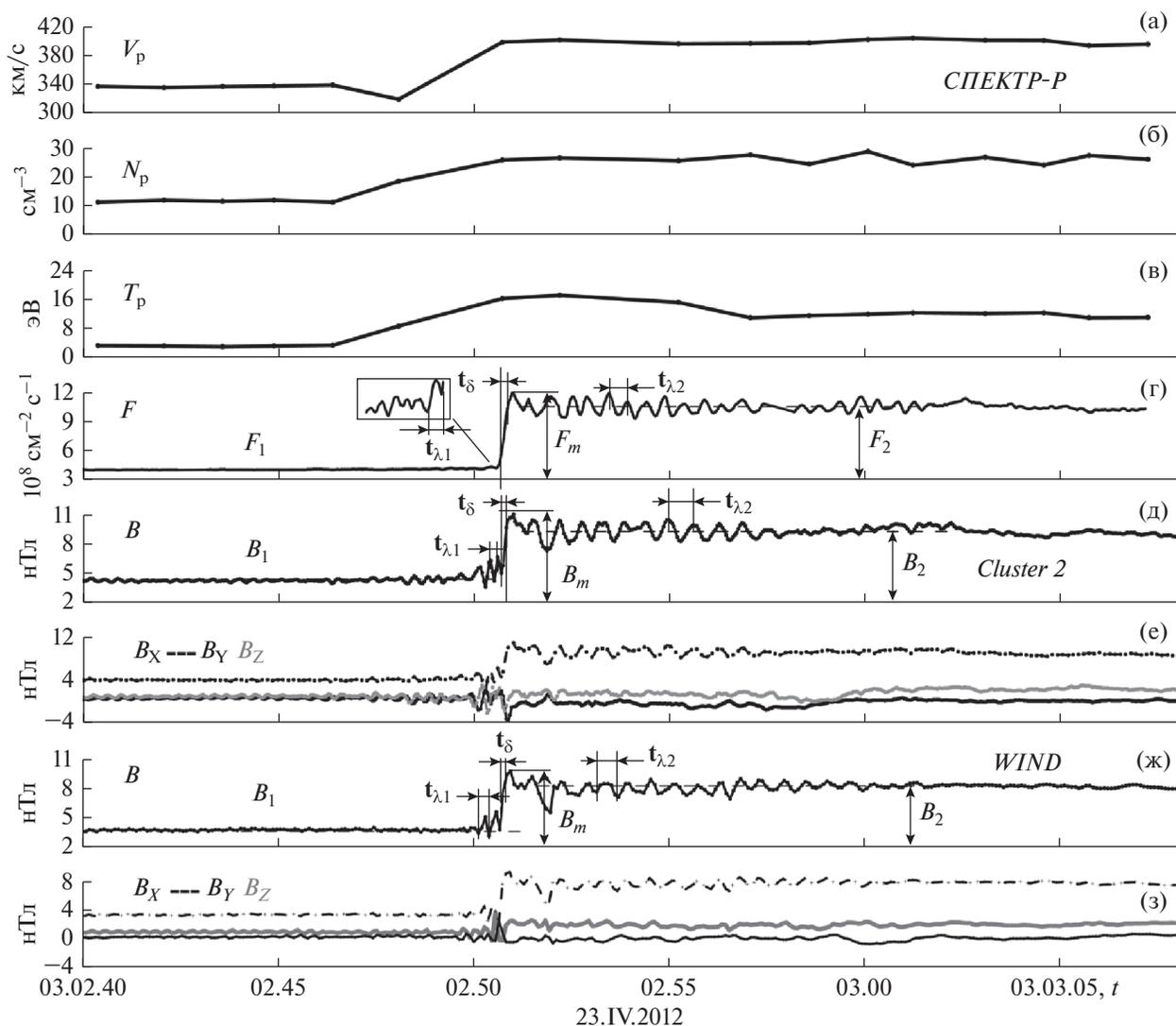


Рис. 1. Временные профили скорости, плотности, температуры протонов и потока ионов солнечного ветра, зарегистрированные на КА СПЕКТР-Р (панели а–г) и магнитного поля, зарегистрированные на КА Cluster 2 (панели д–е) и WIND (панели ж–з) 23.IV.2012 г.

ет около  $(4-8) \cdot 10^6$  км, а расстояние между КА WIND и СПЕКТР-Р не превышает  $2 \cdot 10^6$  км.

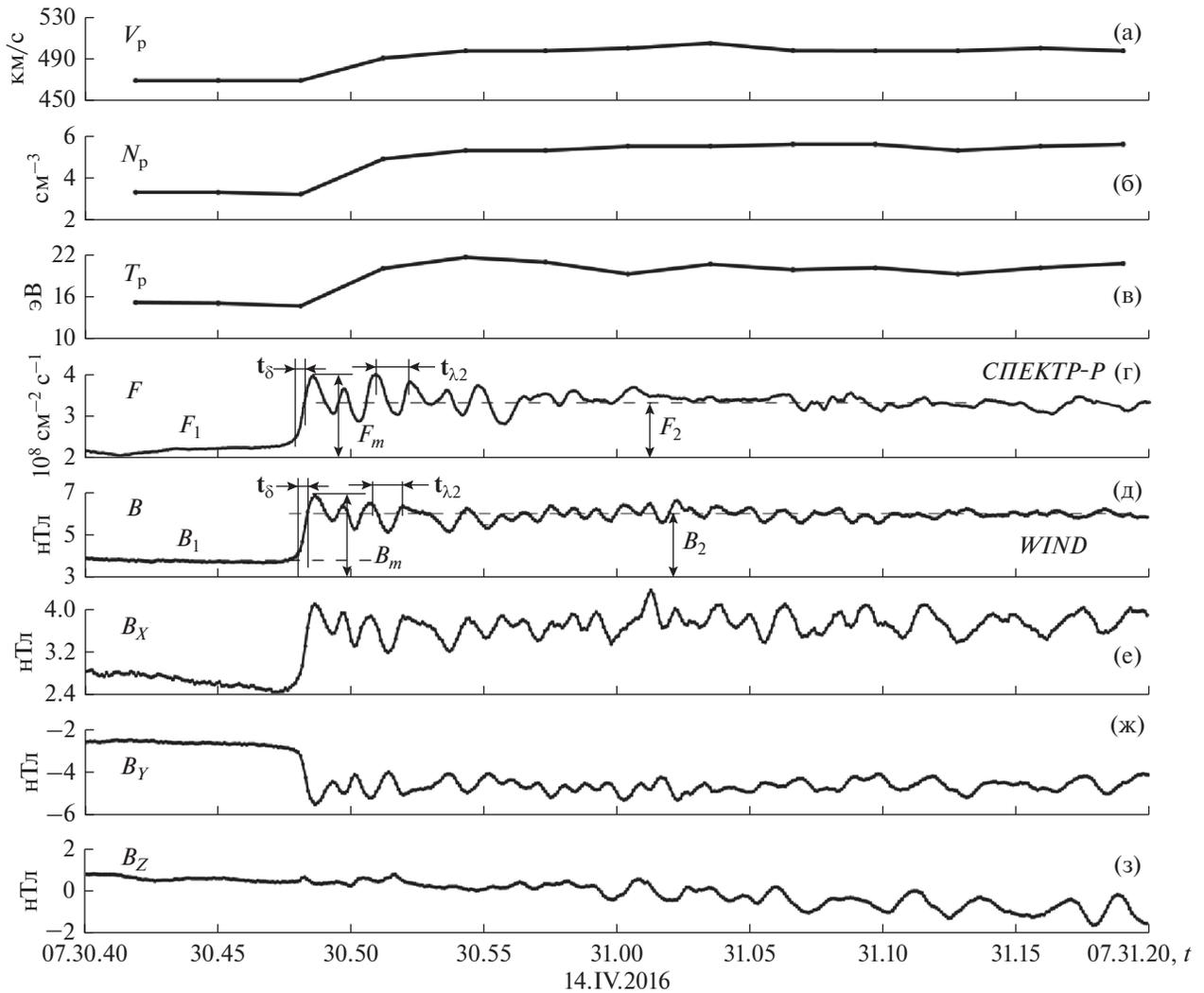
Таким образом, несмотря на большое расстояние между спутниками, измеренные профили потока ионов и магнитного поля оказались подобными друг другу и, следовательно, могут быть использованы для исследования структуры фронта на равных основаниях.

Данный ударный фронт является сверхкритическим, квазиперпендикулярным, так как характеризуется следующими параметрами: альвеновское число Маха  $M_A \approx 3.6$ , угол  $\theta_{Bn} \approx 68^\circ$ , параметр  $\beta_i \approx 0.9$ . Скорость распространения фронта волны  $V_{SH}$  составила 414 км/с.

На профилях потока ионов солнечного ветра и модуля магнитного поля выделяются следующие

структурные особенности фронта: рампы, с временным размером  $t_\delta$ , опережающий его цуг затухающих (при удалении от фронта) колебаний, с длиной волны, имеющей временной масштаб  $t_{\lambda 1}$  и цуг затухающих колебаний за фронтом волны с длиной волны  $t_{\lambda 2}$ . Амплитуда опережающих рампы колебаний потока ионов крайне невелика и составляет порядка 5% от регистрируемого потока ионов, в то время как амплитуда опережающих колебаний магнитного поля намного больше и составляет до 25% от его среднего значения перед ударным фронтом.

Непосредственно за рампом регистрируются овершуты (выбросы) в величине магнитного поля и потока ионов относительно среднего значения этих величин за ударным фронтом, за которым следуют затухающие колебания.



**Рис. 2.** Временные профили скорости, плотности, температуры протонов и потока ионов солнечного ветра, зарегистрированные на КА *СПЕКТР-Р* (панели а–г) и магнитного поля, зарегистрированные на КА *WIND* (панели д–з) 14.IV.2016 г.

На рис. 1 горизонтальными пунктирными прямыми, кроме средних значений магнитного поля  $B_1$  и  $B_2$  и потока ионов  $F_1$  и  $F_2$  перед и за фронтом, показаны величины  $B_m$  и  $F_m$ , определяющие овершуты магнитного поля и потока ионов за ударным фронтом. Величина овершута магнитного поля характеризуется отношением:  $H_m = (B_m - B_2)/B_2$  [11, 23]. Величина овершута по измерениям магнитного поля на КА *Cluster 2* оказалась такой же, как на КА *WIND* и составила величину  $\approx 0.2$ . Подобным образом можно описать величину овершута потока ионов:  $H_i = (F_m - F_2)/F_2$ . В данном случае величина овершута потока ионов составила значение  $\approx 0.17$ , что на 15% меньше величины овершута магнитного поля. Принимая во внимание тот факт, что измерения магнитного поля и потока ионов солнечного ветра производились на спутниках, разнесенных в пространстве, можно

считать удовлетворительным совпадение значений овершуты магнитного поля друг с другом и со значением овершута потока ионов.

Зная скорость солнечного ветра за рампом и измеренную длительность колебания, можно определить пространственный размер колебаний за ударным фронтом. Для межпланетной ударной волны, зарегистрированной 23.IV.2012, длина волны колебаний за фронтом волны по плазменным измерениям составила  $\sim 200$  км, а та же длина волны по измерениям магнитного поля – 206 км для КА *WIND* и – 215 км для КА *Cluster 2*. Полученные оценки хорошо совпадают друг с другом, хотя расстояния между спутниками большие.

Другой пример наблюдения фронта межпланетной ударной волны с высоким временным разрешением представлен на рис. 2. На рис. 2 показаны временные профили скорости, плотности, тем-

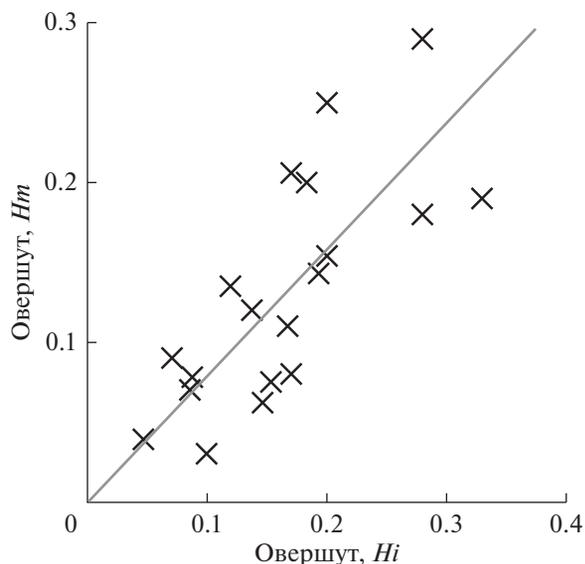


Рис. 3. Зависимость величины овершута в потоке ионов от величины овершута в магнитном поле. Прямая линия — аппроксимации экспериментальных данных.

пературы протонов и потока ионов солнечного ветра, зарегистрированные на КА СПЕКТР-Р (панели а–г) и профили магнитного поля, зарегистрированные на КА WIND (панели д–з) 14.IV.2016. Данный ударный фронт имел следующие параметры: альвеновское число Маха  $M_A \approx 2.9$ , угол  $\theta_{Вн} \approx 66^\circ$ , параметр  $\beta_i \approx 1.5$ . Скорость ударной волны  $V_{SH}$  составила  $\sim 465$  км/с.

Несмотря на большое расстояние между спутниками,  $\sim 250 R_E$ , измеренные профили параметров демонстрируют схожесть друг с другом. На профилях потока ионов и магнитного поля выделяются характерные детали: резкое изменение всех параметров в 07.30.48 UT, связанное с пересечением рампа ударной волны и развитие за рампом интенсивного овершута и колебаний как в потоке ионов, так и в магнитном поле. Горизонтальными пунктирными прямыми линиями на рис. 2 показаны средние значения магнитного поля  $B_1$  и  $B_2$  и потока ионов  $F_1$  и  $F_2$  до и за фронтом волны, а также показаны максимальные значения  $B_m$  и  $F_m$ , определяющие овершуты магнитного поля и потока ионов за ударным фронтом. Величина овершута магнитного поля составила порядка 0.15. Величина овершута потока ионов составила порядка 0.19, что на четверть больше величины овершута магнитного поля. Длина волны колебаний за фронтом ударной волны по измерениям потока ионов совпадает с длиной волны колебаний магнитного поля и находится в диапазоне 460–480 км.

Следует отметить, что толщина рампа, величина овершута, длина волны колебаний, опережаю-

щих или отстающих от рампа могут определяться по измерениям плазмы или магнитного поля с высоким временным разрешением, причем с увеличением временного разрешения точность определения подобных пространственных размеров возрастает.

#### 4. СТАТИСТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ

Для статистического исследования связи величины овершута с характерными параметрами ударной волны из 57 межпланетных ударных волн, зарегистрированных прибором БМСВ в солнечном ветре, было отобрано 18 событий с квазиперпендикулярными фронтами, в которых наблюдался овершут в измерениях магнитного поля и потока ионов солнечного ветра. В большинстве событий овершут в магнитном поле и/или потоке ионов не наблюдался. Кроме того, для 5 ударных волн отсутствуют измерения магнитного поля с высоким временным разрешением. Зависимость величины овершута в потоке ионов от величины овершута в магнитном поле показана на рис. 3. Прямой линией на рисунке дана аппроксимация экспериментальных значений. Видно, что экспериментальные значения могут быть удовлетворительно аппроксимированы линейной зависимостью. Овершуты в потоке имеют, в среднем, большие значения, чем овершуты в магнитном поле. Это может быть связано с различием во временном разрешении плазменных и магнитных измерений, из-за эффекта турбулентности в данных с высоким временным разрешением. Большой разброс в полученных значениях отражает тот факт, что овершут — явление, регистрируемое у ударных волн с большими числами Маха. А у таких ударных волн может проявляться нестационарность и реформация/изменчивость ударного фронта, причем как со временем при распространении, так и в пространстве.

Зависимость величины овершута от числа Маха представлена на рис. 4. На левой части рисунка показаны значения овершута в магнитном поле, на правой части рисунка даны овершуты в потоке ионов солнечного ветра. Прямыми линиями показаны линейные аппроксимации экспериментальных данных. Видно, что с ростом числа Маха величина овершута, в среднем, возрастает, несмотря на довольно большой разброс точек. Примерно половина овершуты была зарегистрирована у межпланетных ударных волн с числами Маха, меньшими, чем значение первого критического числа Маха. Данный результат может отражать тот факт, что дисперсия косых магнитозвуковых волн и отраженные ионы вместе вносят свой вклад в формирование структуры фронта ударной волны с числом Маха меньше, чем первое критическое число Маха.

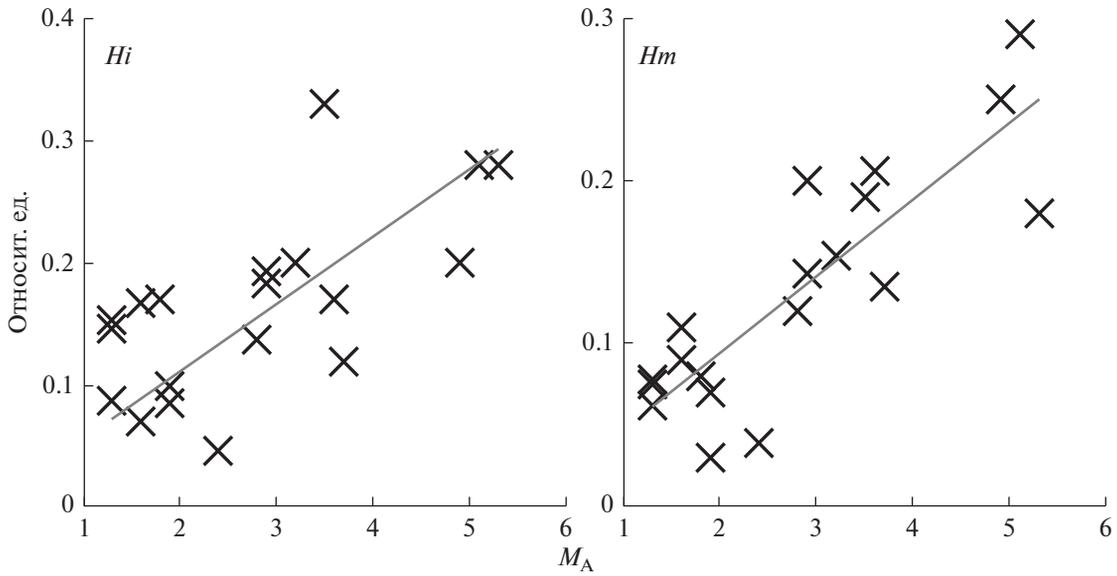


Рис. 4. Зависимость величины овершута от числа Маха. Слева показаны значения овершута в потоке ионов солнечного ветра, справа даны овершуты в магнитном поле.

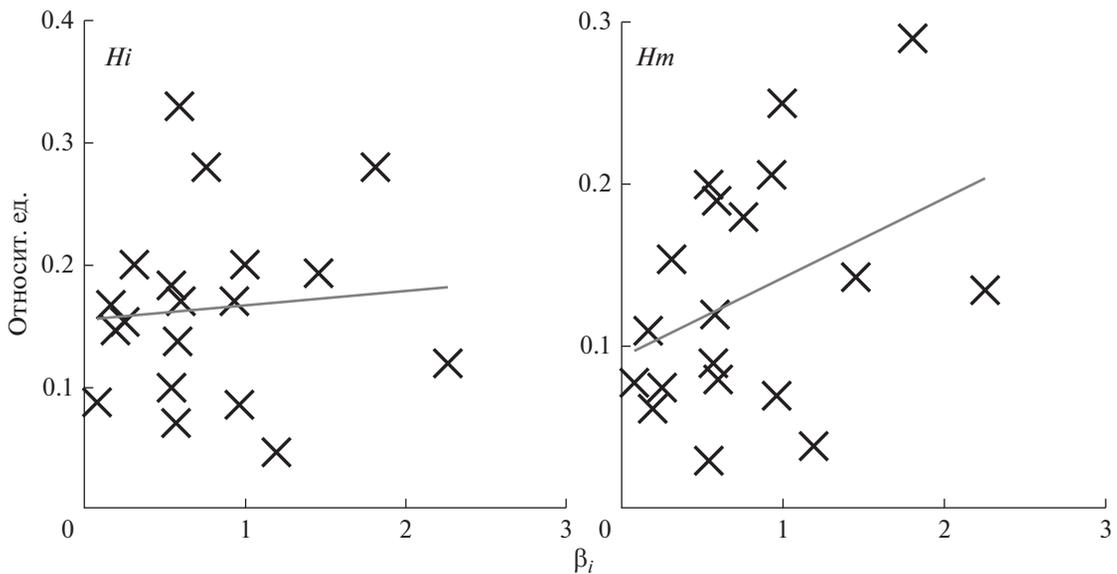


Рис. 5. Зависимость величина овершута в потоке ионов (слева) и в магнитном поле (справа) от ионного параметра бета  $\beta_i$ .

В работе [27] было получено, что величина овершута увеличивается с ростом электронного параметра бета  $\beta_e$ . Подобная зависимость отсутствует для событий из нашей базы данных. В среднем, как показано на рис. 5, прослеживается тенденция к увеличению величины овершута с ростом ионного параметра бета  $\beta_i$ , однако разброс точек довольно большой и присутствуют выбивающиеся из зависимости точки.

Так как за рампом анализируемых ударных волн наблюдались коррелированные затухающие

при удалении от рампа колебания в потоке ионов и магнитного поля, то для всех событий был выполнен частотный анализ измерений и определены длины волн колебаний, как по потоку ионов, так и по магнитному полю. Зависимость длины волны колебаний потока ионов от длины волны колебаний магнитного поля за рампом ударной волны дана на рис. 6. Из рис. 6 следует, что длина волны колебаний за рампом, определенная по измерениям потока ионов, в среднем, совпадает с длиной волны колебаний магнитного поля, что

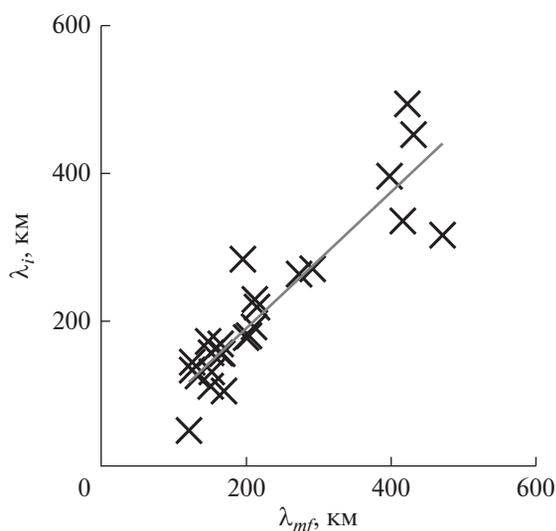


Рис. 6. Зависимость длины волны колебаний потока ионов от длины волны колебаний магнитного поля за рампом ударной волны.

подтверждает, что эти колебания являются одинаковыми и имеют один и тот же источник генерации – рамп.

Поиск связи длины волны колебаний с параметрами, влияющими на структуру фронта ударной волны – числом Маха, углом  $\theta_{BN}$ , параметром бета и другими параметрами, ничего не дал. Однако была получена линейная зависимость оценки длины волны колебаний за ударным фронтом от гирорадиуса ионов, показанная на рис. 7. Таким образом, оценка длины волны колебаний в области овершута коррелирует с величиной гиро-

радиуса захваченных ионов, превышая его примерно в 5 раз. Этот результат свидетельствует о том, что механизм формирования анализируемых межпланетных ударных волн связан с совместным движением втекающего потока солнечного ветра и пучка отраженных вращающихся ионов, как было предложено в работах [40, 41].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе по данным измерений прибора БМСВ, дополненных измерениями магнитного поля на КА *WIND*, был проведен анализ 18 межпланетных ударных волн, в структуре фронта которых наблюдался овершут в измерениях магнитного поля и потока ионов солнечного ветра. Все ударные волны, кроме одной, были квазиперпендикулярными, с числами Маха  $M_A$ , варьирующимися от  $\sim 1.3$  до 6.8, и параметром бета  $\beta_i$ , лежащим в диапазоне значений от  $\sim 0.09$  до 2.3. Аналогично тому, как это было сделано в работе [23], для всех ударных волн была проведена оценка величины овершута, как в магнитном поле, так и в потоке ионов. Было показано, что оценка величины овершута магнитного поля удовлетворительно совпадает со значением овершута в потоке ионов. Значения овершуты в потоке ионов имели, в среднем, слегка большие значения, чем овершуты в магнитном поле. Это может быть связано с тем, что, с одной стороны, плазменные измерения имели более высокое временное разрешение, чем магнитные измерения и поэтому в них сильнее проявлялся уровень турбулентности среды. С другой стороны, для событий с большими числами Маха разброс в полученных значениях овер-

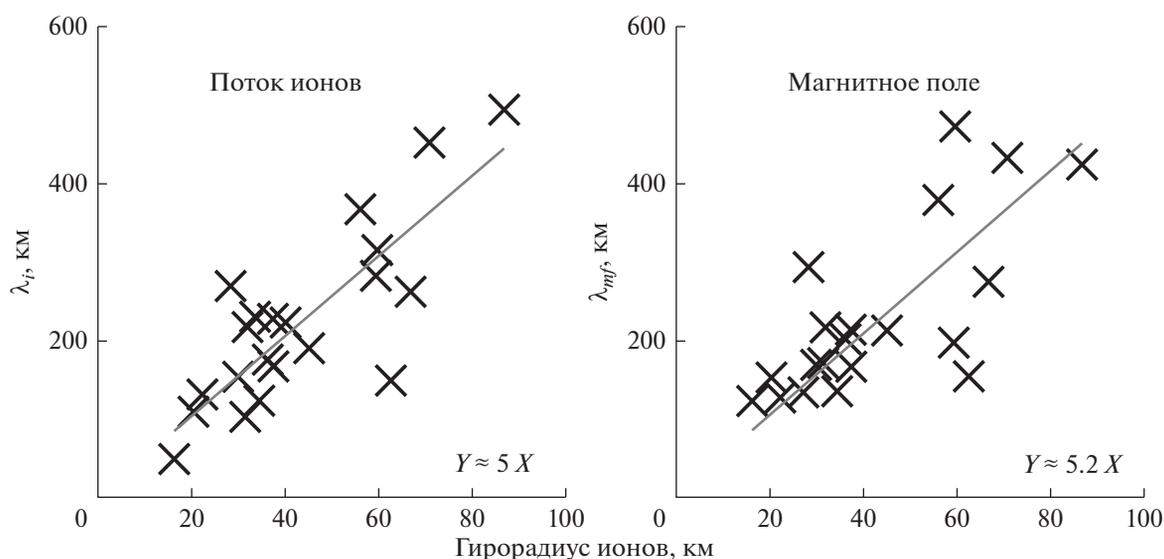


Рис. 7. Зависимость длины волны колебаний потока ионов (слева) и длины волны колебаний магнитного поля (справа) от гирорадиуса захваченных ионов.

шута может быть следствием нестационарности ударного фронта как со временем при распространении, так и в пространстве.

Получено, что с ростом числа Маха величина овершута, в среднем, возрастает. Этот вывод совпадает с выводами, сделанными в работах [11, 27]. Показано также, что овершуты образуются не только у сверхкритических ударных волн, но и у тех, у которых числа Маха меньше или приближаются к значению первого критического числа Маха. Наличие овершутов у ударных волн с числами Маха ниже значения первого критического числа, указывает на присутствие ионов, отраженных от рампы докритических ударных волн.

Зависимость величины овершута от параметра бета  $\beta_e$  отсутствует для событий из нашей базы данных. В среднем, прослеживается тенденция к увеличению величины овершута с ростом параметра бета  $\beta_i$ , однако разброс точек довольно большой и присутствуют выбивающиеся из зависимости точки.

За фронтом ударных волн с овершутами наблюдались коррелированные, затухающие при движении от рампы колебания параметров потока ионов и магнитного поля. Эти колебания могут быть сформированы образованием в пределах ударного фронта двух популяций ионов: втекающим солнечным ветром и пучком отраженных вращающихся ионов, которые, постепенно двигаясь по спирали, смешиваются и формируют нагретую плазму за ударным фронтом [41].

Для всех ударных волн был определен пространственный размер колебаний потока ионов и магнитного поля. Получено, что длина волны колебаний за рампом, определенная по измерениям потока ионов, совпадает с длиной волны колебаний магнитного поля, что служит доказательством того, что эти колебания – проявления одного и того же процесса.

Корреляция длины волны колебаний потока ионов или магнитного поля с числом Маха, углом  $\theta_{\text{ВН}}$ , параметром бета, ионной инерционной длиной не была выявлена. Обнаружена хорошая корреляция между оценкой длины волны колебаний и конвекционным ионным гирорадиусом: длина волны примерно в пять раз превышает гирорадиус захваченных ионов. Подобное масштабирование длины волны колебаний за рампом ударной волны с гирорадиусом захваченных ионов свидетельствует в пользу интерпретации, предложенной, например, в работах [40, 41].

Авторы выражают признательность NASA CDAWEB за возможность использования данных о параметрах плазмы и магнитного поля, измеренных на спутниках *WIND*, *Cluster*. Работа была выполнена при поддержке гранта РФФ № 16-12-10062.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sagdeev P.Z.* Коллективные процессы и ударные волны в разреженной плазме / Вопросы теории плазмы / Ред. Леонтович М.А. М.: Атомиздат, 1964. С. 20.
2. *Galeev A.A., Sagdeev R.Z.* Lecture on the nonlinear theory of plasma. Trieste, Italy. 1966. P. 38.
3. *Tidman D.A.* Turbulent shock waves in plasma // *Phys. Fluids*. 1967. V. 10. P. 547.
4. *Formisano V.* Collisionless shock waves in space and astrophysical plasmas // *Proc. ESA Workshop on Future Missions in Solar, Heliospheric and Space Plasma Physics*. V. ESA SP-235. 1985. P. 83.
5. *Kennel C.F., Edmiston J.P., Haeda T.* A quarter century of collisionless shock research / R.G. Stone & B.T. Tsurutany. *Collisionless Shocks in Heliosphere: A Tutorial Review*, Geophysical Monograph Series. Washington, DC: American Geophysical Union. 1985. V. 34. P. 1–36.
6. *Mellott M.M., Greenstadt E.W.* The structure of oblique subcritical bow shocks: ISEE-1 and 2 observations // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. P. 2151–2161.
7. *Lembège B., Giacalone J., Scholer M. et al.* Selected problems collisionless shock physics // *Space Sci. Rev.* 2004. V. 110, P. 161–226.
8. *Bale S.D., Balikhin M.A., Horbury T.S. et al.* Quasi-perpendicular Shock Structure and Processes // *Space Sci. Rev.* 2005. V. 118. P. 161–203.
9. *Krasnoselskikh V., Balikhin M., Walker S.N. et al.* The Dynamic Quasiperpendicular Shock: Cluster Discoveries // *Space Sci. Rev.* 2013. V. 178. Issue 2–4. P. 535–598.
10. *Borodkova N.L., Eseevich V.G., Zastenker G.N. et al.* Fine structure of interplanetary shock front – results from BMSW experiment with high time resolution // *J. Geophys. Res.* 2019. V. 124. <https://doi.org/10.1029/2018JA026255>
11. *Farris M.H., Russell C.T., Thomsen M.F.* Magnetic Structure of the Low Beta, Quasi-Perpendicular Shock // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 15285–15294.
12. *Wilson III L.B., Koval A., Szabo A. et al.* Revisiting the structure of low-Mach number, low-beta, quasi-perpendicular shocks. // *J. Geophys. Res.* 2017. V. 122. № 9. P. 9115–9133.
13. *Ramírez Vélez J.C., Blanco-Cano X., Aguilar-Rodríguez E. et al.* Whistler waves associated with weak interplanetary shocks // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. A11103. <https://doi.org/10.1029/2012JA017573>
14. *Thomsen M.F., Gosling J.T., Bame S.J. et al.* Ion and electron heating at collisionless shocks near the critical Mach number // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90. P. 137.
15. *Gedalin M.* Ion dynamics and distribution at the quasi-perpendicular collisionless shock front // *Surv. Geophys.* 1997. V. 18. P. 541–566.
16. *Hobara Y., Balikhin M., Krasnoselskikh V. et al.* Statistical study of the quasi-perpendicular shock ramp widths // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. A11106. <https://doi.org/10.1029/2010JA015659>
17. *Mazelle C., Lembège B., Morgenthaler A. et al.* Self-reformation of the quasi-perpendicular shock: Cluster observations // *AIP Conference Proceedings*. 2010. 1216. P. 471–474.

18. *Nemecek Z., Safrankova J., Goncharov O. et al.* Ion scales of quasi-perpendicular low-Mach-number interplanetary shocks // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. P. 4133–4137.
19. *Sapunova O.V., Borodkova N.L., Zastenker G.N. et al.* Fine structure of interplanetary shock fronts from the data of the BMSW instrument of the PLASMA-F experiment // *Cosmic Research.* 2017. V. 55. № 6. P. 396–402.
20. *Heppner J.P., Sugiura M., Skillman T.L. et al.* OGO-A magnetic field observations // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72. № 11. P. 5417.
21. *Russell C.T., Greenstadt E.W.* Initial ISEE magnetometer results – Shock observation // *Space Sci. Rev.* 1979. V. 23. P. 3–37.
22. *Leroy M.M., Goodrich C.C., Winske D. et al.* The structure of perpendicular bow shocks // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. P. 5081–5094.
23. *Livesey W.A., Kennel C.F., Russell C.T.* ISEE-1 and -2 observations of magnetic field strength overshoots in quasi-perpendicular bow shocks // *Geophys. Res. Lett.*, 1982. V. 9. P. 1037–1040.
24. *Skopke N., Paschmann G., Bame S.J. et al.* Evolution of ion distributions across the nearly perpendicular bow shock-specularly and non-specularly reflected-gyrating ions // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88. P. 6121–6136.
25. *Russell C.T., Hoppe M.M., Livesey W.A.* Overshoots in planetary bow shocks // *Nature.* 1982. V. 296. P. 45–48.
26. *Edmiston J.P., Kennel C.F.* A parametric survey of the first critical Mach number for a fast MHD shock // *J. Plasma Physics.* 1984. V. 32 № 3. P. 429–441.
27. *Mellott M.M., Livesey W.A.* Shock overshoots revisited // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. P. 13661–13665.
28. *Tatrallyay M., Gevai G., Apathy I. et al.* Magnetic field overshoots in the Martian bow shock // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 2157–2163.
29. *Saxena R., Bale S., Horbury T.S.* Wavelength and decay length of density overshoot structure in supercritical, collisionless bow shocks // *Physics of Plasmas.* 2005. V. 12. 052904. 2005. <https://doi.org/10.1063/1.1900093>
30. *Balikhin M.A., Nozdrachev M., Dunlop M. et al.* Observation of the terrestrial bow shock in quasi-electrostatic subshock regime // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. P. 1155–1163.
31. *Newbury J.A., Russell C.T., Gedalin M.* The ramp width of high-Mach-number, quasi-perpendicular collisionless shock // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 29581–29593.
32. *Kajdič P., Preisser L., Blanco-Cano X. et al.* First Observations of Irregular Surface of Interplanetary Shocks at Ion Scales by Cluster // *Astrophysical Journal Letters.* 2019. 874:L13
33. *Dimmock A.P., Russell C.T., Sagdeev R.Z. et al.* Direct evidence of nonstationary collisionless shocks in space plasmas // *Sci. Adv.* 2019. V. 5: eaau9926. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau9926>
34. *Safrankova J., Nemecek Z., Prech L. et al.* Fast Solar Wind Monitor (BMSW): Description and First Results // *Space Sci. Rev.* 2013. V. 175. P. 165–182.
35. *Zastenker G.N., Safrankova J., Nemecek Z. et al.* Fast measurements of parameters of the solar wind using the BMSW instrument // *Cosmic Research.* 2013. V. 51. № 2. P. 78–89.
36. *Lepping R.P., Acuna M.H., Burlaga L.F. et al.* The WIND Magnetic Field Investigation // *Space Sci. Rev.* 1995. V. 71. P. 207.
37. *Weygand J.M., Matthaeus W.H., Kivelson M.G. et al.* Magnetic correlation functions in the slow and fast solar wind in the Eulerian reference frame // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 3995–4004.
38. *Matthaeus W.H., Weygand J.M., Dasso S.* Ensemble Space-Time Correlation of Plasma Turbulence in the Solar Wind // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116. 245101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.245101>
39. *Eselevich M.V., Eselevich V.G.* Fractal Structure of the Heliospheric Plasma Sheet in the Earth's Orbit // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2005. V. 45 № 3. P. 326–336.
40. *Balikhin M.A., Zhang T.L., Gedalin M. et al.* Venus Express observes a new type of shock with pure kinematic relaxation // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35 L01103. <https://doi.org/10.1029/2007GL032495>
41. *Omidi N., Blanco-Cano X., Russell C.T.* Macrostructure of collisionless bow shocks: 1. Scale lengths // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A12212. <https://doi.org/10.1029/2005JA011169>