

УДК 523.62-726

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ПОТОКА ИОНОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ОБЛАСТИ ОВЕРШУТА МЕЖПЛАНЕТНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

© 2021 г. Н. Л. Бородкова¹, *, О. В. Сапунова¹, **, В. Г. Еселевич², Г. Н. Застенкер¹, Ю. И. Ермолаев¹

¹Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

²Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ РАН), г. Иркутск, Россия

*e-mail: nlbor@mail.ru

**e-mail: sapunova_olga@mail.ru

Поступила в редакцию 06.04.2021 г.

После доработки 27.04.2021 г.

Принята к публикации 27.05.2021 г.

По данным плазменного спектрометра БМСВ, установленного на космическом аппарате СПЕКТР-Р, была исследована структура течения плазмы солнечного ветра за рампом межпланетной ударной волны. Особое внимание было уделено области овершута, в которой наблюдаются коррелированные, затухающие при удалении от рампа колебания потока ионов и магнитного поля, сформированные двумя популяциями ионов: втекающим солнечным ветром и пучком отраженных ионов. На основании анализа 26 пересечений фронтов межпланетных ударных волн, в которых наблюдались овершуты в величине потока ионов и магнитного поля, было показано, 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. Получено, что на формирование и величину амплитуды овершута в структуре фронта ударной волны оказывают существенное влияние угол между нормалью к фронту ударной волны и вектором магнитным полем перед фронтом, число Маха, магнитная и плазменная компрессия на фронте волны. Установлено, что длина волны колебаний, определенная по измерениям магнитного поля на космическом аппарате WIND, в среднем, совпадает с длиной волны колебаний, определенной по потоку ионов на космическом аппарате СПЕКТР-Р, а пространственные масштабы областей затухания колебаний могут сильно различаться.

DOI: 10.31857/S0016794021050047

1. ВВЕДЕНИЕ

Бесстолкновительные ударные волны имеют широкое распространение во Вселенной. Они встречаются, например, вокруг остатков сверхновых звезд, а в нашей солнечной системе — в виде планетарных и межпланетных ударных волн (МУВ). Ударные волны эффективно термализуют сверхзвуковые потоки плазмы и являются мощными ускорителями заряженных частиц. Масштабом, на котором происходят эти изменения, является фронт ударной волны. Наиболее важными параметрами, характеризующими структуру фронта ударной волны, являются магнитозвуковое число Маха M_{MS} , угол θ_{Bn} между направлением вектора магнитного поля перед фронтом и нормалью к фронту волны и параметр бета β — отношение газового давления к магнитному [Formisano, 1985; Kennel et al., 1985].

В настоящее время наиболее подробно изучена структура фронта квази-перпендикулярной

магнитозвуковой ударной волны, [например, Mellott and Greenstadt, 1984; Bale et al., 2005; Krasnoselskikh et al., 2013; Borodkova et al., 2019]. В структуре фронта квази-перпендикулярной ударной волны по измерениям магнитного поля выделяются, как правило, области подножия, рампа и овершута [Kennel et al., 1985]. Кроме того, перед рампом могут образовываться быстрые магнитозвуковые или вистлеровские волны [например, Mellott and Greenstadt, 1984; Farris et al., 1993; Ramírez Vélez et al., 2012; Wilson et al., 2017], а за ним развиваться когерентные колебания магнитного поля большой амплитуды [Leroy et al., 1982; Schopke et al., 1983; Burgess et al., 1989; Ofman et al., 2009].

Подножие перед рампом квази-перпендикулярной ударной волны формируется при увеличении числа Маха и приближении его к значению первого критического числа Маха M_{CB} , когда скорость звука за рампом сравнивается со скоростью плазмы. Одновременно за рампом начинают

регистриваться периодические повышения (овершуты) и провалы (андершуты) в величине магнитного поля относительно среднего значения поля за ударным фронтом [например, Russell and Greenstadt, 1979; Livesey et al., 1982, Sckopke et al., 1983].

Первые результаты детального исследования поведения овершута были приведены в работе [Livesey et al., 1982]. На основании анализа 110 пересечений квази-перпендикулярной околоземной ударной волны было получено, что амплитуда овершута 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 [Edmiston and Kennel, 1984] предположили, что такое отражение должно встречаться только на фронтах квази-перпендикулярных ударных волн с числами Маха, большими, чем первое критическое число Маха. Было показано, что колебания магнитного поля большой амплитуды за рампом сверхкритической ударной волны возникают из-за негиротропной части функции распределения – пучка отраженных ионов [Leroy et al., 1982; Sckopke et al., 1983; Scudder et al., 1986; Burgess et al., 1989]. В работе [Mellott and Livesey, 1987] 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. Было показано, что овершуты существуют и в структуре ударных волн других планет и величина овершута также возрастает при увеличении параметра бета и числа Маха [Russell et al., 1982].

Конфигурация перпендикулярной сверхкритической ударной волны исследовалась методами гибридного моделирования [Leroy et al., 1982]. 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 квази-перпендикулярных ударных волн, включая морфологию потока отраженных ионов, поведение профиля магнитного поля на всем протяжении скачка и зависимость величины овершута магнитного поля от числа Маха.

Считалось, что распределение ионов за рампом ударных волн с малыми числами Маха является почти гиротропным из-за отсутствия отраженных ионов, и поэтому у таких волн структура овершут-андершут образовываться не будет. Однако в работе [Balikhin et al., 2008] был исследован ударная волна с очень малым числом Маха и малым параметром бета, за рампом которой на-

блюдались когерентные затухающие колебания магнитного поля, характерные для сверхкритических ударных волн. Было обнаружено, что такие колебания, хотя и менее упорядоченные, часто встречаются за рампом ударных волн с малыми числами Маха [Russell et al., 2009]. С помощью моделирования было получено, что появление подобных колебаний может являться результатом когерентного вращения ионов при пересечении рампа ударной волны и последующей бесстолкновительной релаксацией за счет гирофазного перемешивания [Balikhin et al., 2008; Ofman et al., 2009; Gedalin et al., 2015]. Также было показано, что максимальная амплитуда овершута в основном определяется величиной магнитного сжатия и потенциалом на фронте волны, тогда как скорость затухания колебаний за рампом связана с отношением тепловой скорости к скорости ионов невозмущенного солнечного ветра [Gedalin et al., 2015, 2020].

Впервые измерения плотности электронов солнечного ветра с временным разрешением 250 мс в области овершута – андершута за фронтом 56 пересечений околоземной волны по данным космического аппарата (КА) Кластер были приведены в работе [Bale et al., 2005]. Было показано, что оценка длины области затухания колебаний хорошо коррелирует с величиной гирорадиуса захваченных ионов и не коррелирует со значением ионной инерционной длины.

К настоящему времени понимание структуры фронта ударной волны существенно улучшилось благодаря появлению измерений, выполненных приборами с высоким временным разрешением, в первую очередь спектрометрами плазмы солнечного ветра, например, [Mazelle et al., 2010; Nemecek et al., 2013; Johlander et al., 2016; Kajdič et al., 2019; Dimmock et al., 2019; Borodkova et al., 2019]. Масштабы, на которых проводится экспериментальное исследование ударных волн, сместились в сторону процессов, происходящих в пределах нескольких ионно-конвективных гирорадиусов в обоих направлениях от рампа вдоль нормали к фронту ударной волны. [Wilson et al., 2012, 2017; Johlander et al., 2016; Еселевич и др., 2017; Gingell et al., 2017; Dimmock et al., 2019]. Все это позволило собрать много экспериментальных данных о структуре фронта ударной волны, в том числе и овершуты. Показано, что фронт ударной волны с числом Маха, превышающим значение первого критического числа Маха, может быть нестационарным [Mazelle et al., 2010]. На ударном фронте могут возникать неоднородности, причиной которых могут быть магнитные структуры, расположенные перед рампом и конвектируемые внутрь рампа [Kajdič et al., 2019]. Первые прямые измерения по данным КА Кластер нестационарности фронта ударной волны показали, что переход к нестационарности происходит внутри рам-

па на электронных масштабах [Dimmock et al., 2019]. С помощью измерений на четырех близко расположенных космических аппаратах *MMS* впервые была получена подробная картина волнистости квази-перпендикулярной ударной волны на кинетических масштабах [Johlander et al., 2016; Gingell et al., 2017].

К настоящему времени временное разрешение плазменных экспериментов почти сравнялось с временным разрешением магнитных экспериментов. И это позволяет исследовать структуру фронта межпланетной ударной волны не только по измерениям магнитного поля, но и по измерениям параметров плазмы солнечного ветра. В данной работе по измерениям с высоким временным разрешением прибора БМСВ на КА СПЕКТР-Р будут определены значения овершутов для межпланетных ударных волн, длины волн колебаний за рампом в области овершутов и проведен их анализ в зависимости от характеристик ударных волн. Будет показана зависимость амплитуды овершута от числа Маха, параметра бета, магнитной и плазменной компрессии. Будет представлена корреляция между оценкой длины волны колебаний и ионным гирорадиусом. Будут получены пространственные масштабы областей затухания колебаний.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИХ ОБРАБОТКИ

В работе 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⁻³).

Прибор БМСВ был разработан для достижения наиболее высокого временного разрешения в определении параметров плазмы солнечного ветра. Величина и направление полного потока ионов солнечного ветра измерялись с разрешением 0.031 с. Гидродинамические параметры плазмы солнечного ветра (скорость, температура и концентрация) определялись с временным разрешением 1 с, а для отдельных интервалов времени — с разрешением 0.031 с. Детальное описание прибора БМСВ приведено в работах [Nemesek et al., 2013; Safrankova et al., 2013; Застенкер и др., 2013].

Одним из основных параметров, характеризующих фронт МУВ, является угол $\theta_{\text{Вн}}$ между нормалью к фронту волны и направлением вектора магнитного поля. Для определения угла $\theta_{\text{Вн}}$ необходимо знать направление нормали к фронту ударной волны и направление магнитного поля. Так как измерения магнитного поля на КА СПЕКТР-Р не проводились, то для определения

направления 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 [Lepping et al., 1995]. Кроме того, начиная с 2016 года, использовались данные измерений магнитного поля с разрешением 0.02 с, полученные прибором MAG на КА DSCOVR (см. сайт <https://www.ngdc.noaa.gov/dscovr/portal/>).

Для определения нормали и скорости ударной волны V_{SH} применялся геометрический метод. 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, DSCOVR, а спутники Cluster и Geotail периодически выходили в солнечный ветер. 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. ПРИМЕР НАБЛЮДЕНИЯ ОВЕРШУТА ЗА ФРОНТОМ МУВ

Основные структурные особенности фронта межпланетной ударной волны, зарегистрированной 14 апреля 2016 г., приведены на рис. 1. На рисунке 1 показаны временные профили скорости, плотности, температуры протонов и потока ионов солнечного ветра, зарегистрированные на КА СПЕКТР-Р (панели *a–z*) и профили магнитного поля, зарегистрированные на КА WIND (панели *d–e*). Временное разрешение измерений параметров плазмы — скорости, плотности и температуры протонов солнечного ветра в данном случае невелико и составляет 3 с, в то время как измерения потока ионов солнечного ветра имеют временное разрешение 0.031 с. Временное разрешение измерений магнитного поля на КА WIND составляет 0.091 с.

Координаты КА СПЕКТР-Р и WIND в системе координат GSE имели значения $X = -4.39R_E$, $Y = 49.92R_E$, $Z = 16.82R_E$, и $X = 249.62R_E$, $Y = -68.48R_E$, $Z = 15.10R_E$, соответственно. 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 волны по магнитным измере-

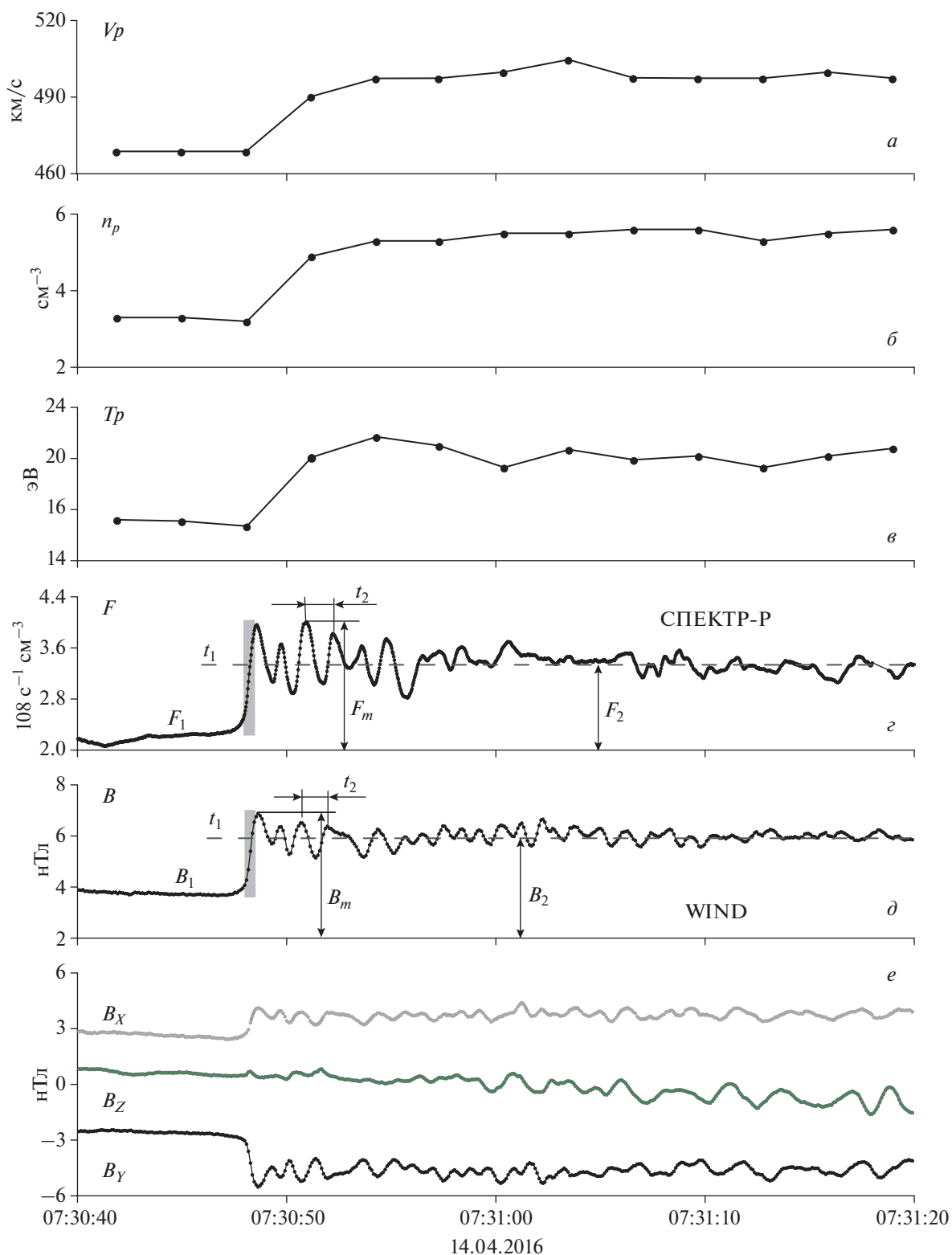


Рис. 1. Временные профили скорости, плотности, температуры протонов и потока ионов солнечного ветра, зарегистрированные на КА СПЕКТР-P (панели а–г) и магнитного поля, зарегистрированные на КА WIND (панели д–е) 14 апреля 2016 г.

ниям и потоку ионов совпали. Данные измерений на КА WIND были сдвинуты на 2036 с для совмещения с данными измерений на КА СПЕКТР-Р.

Принимая во внимание координаты спутников, участки ударного фронта и связанные с ними структуры, наблюдавшиеся на КА WIND и СПЕКТР-Р, могут быть не идентичны. Известно, что в солнечном ветре могут возникать колебания магнитного поля и плазмы. В работе [Weygand et al., 2013] была показана справедливость для медленного солнечного ветра предположения о том, что флуктуации межпланетного магнитного поля в заморожены от точки Лагранжа $L1$ до магнитосферы Земли. Поэтому, наличие флуктуаций магнитного поля в медленном солнечном ветре может мало влиять на его квазистационарную структуру. В то же время известно, что межпланетные ударные волны, как и в данном событии, чаще распространяются в медленном солнечном ветре. А медленный солнечный ветер имеет сильные колебания плотности. Авторы работы [Matthaeus et al., 2016] исследовали пространственно-временную корреляцию турбулентности плотности 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 КА WIND и СПЕКТР-Р, могут заметно отличаться друг от друга. Согласно [Eselevich and Eselevich, 2005], пространственный масштаб, на котором солнечный ветер может считаться однородным по плотности вдоль фронта ударной волны в плоскости эклиптики, составляет около $(4-8) \times 10^6$ км, а расстояние между КА WIND и СПЕКТР-Р во время регистрации межпланетной ударной волны 14 апреля 2016 г. не превышало 2×10^6 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.

Данный ударный фронт является сверхкритическим, квази-перпендикулярным, так как характеризуется следующими параметрами: альвенновское число Маха $M_A \approx 2.9$, угол $\theta_{Вн} \approx 66^\circ$, параметр $\beta_i \approx 1.5$. Скорость распространения фронта волны V_{SH} составила ~ 465 км/с.

На профилях потока ионов и магнитного поля выделяется резкое изменение всех параметров в 07:30:48 UT, связанное с пересечением рампа ударной волны с временным размером t_1 , обозначенным на рисунке серым прямоугольником и развитие за рампом интенсивных колебаний, как в потоке ионов, так и в магнитном поле с длительностью волны t_2 . Горизонтальными пунктирными

линиями на рис. 1 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 характеризуется отношением: $H_m = (B_m - B_2)/B_2$ [Livesey et al., 1982]. Подобным образом можно описать величину овершута потока ионов: $H_i = (F_m - F_2)/F_2$. Величина овершута магнитного поля составила порядка 0.15, а величина овершута потока ионов составила порядка 0.19 для данного события.

Зная скорость солнечного ветра за рампом и измеренную длительность колебания t_2 , можно определить пространственный размер колебаний за ударным фронтом. В данном случае длина волн колебаний за фронтом ударной волны по измерениям потока ионов совпадает с длиной волн колебаний магнитного поля и находится в диапазоне 460–480 км.

Следует отметить, что с увеличением временного разрешения измерений параметров плазмы и магнитного поля точность определения подобных пространственных размеров возрастает.

4. ЗАВИСИМОСТЬ АМПЛИТУДЫ ОВЕРШУТА ОТ ПАРАМЕТРОВ ФРОНТА УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Для исследования зависимости величины овершута от параметров, характеризующих фронт ударной волны, было отобрано 26 случаев из 56 межпланетных ударных волн, зарегистрированных прибором БМСВ в солнечном ветре. В этих событиях наблюдался овершут как в измерениях магнитного поля, так и в потоке ионов солнечного ветра. Следует отметить, что для 21 ударной волны овершут в магнитном поле и потоке ионов не наблюдался. В двух случаях был зарегистрирован овершут только в магнитном поле, а в четырех случаях — только в потоке ионов. Кроме того, для 3-х 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. 2. Штриховой линией на рисунке дана аппроксимация экспериментальных значений. Видно, что экспериментальные значения могут быть удовлетворительно аппроксимированы линейной зависимостью. В среднем, чем выше овершут в магнитном поле, тем больше наблюдается овершут по потоку ионов. Большой разброс в полученных значениях может являться следствием нестационарности и реформации фронта ударной волны, проявляющихся как со временем, так и при распространении в пространстве.

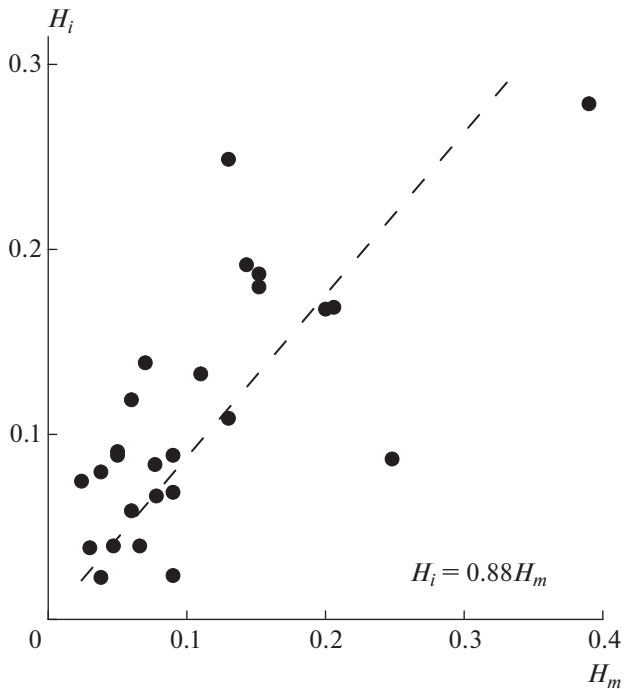


Рис. 2. Зависимость величины овершута в потоке ионов от величины овершута в магнитном поле. Прямая линия — аппроксимации экспериментальных данных.

Зависимость величины овершута в потоке ионов солнечного ветра от числа Маха представлена на рис. 3. Сплошной линией показана линейная аппроксимация экспериментальных дан-

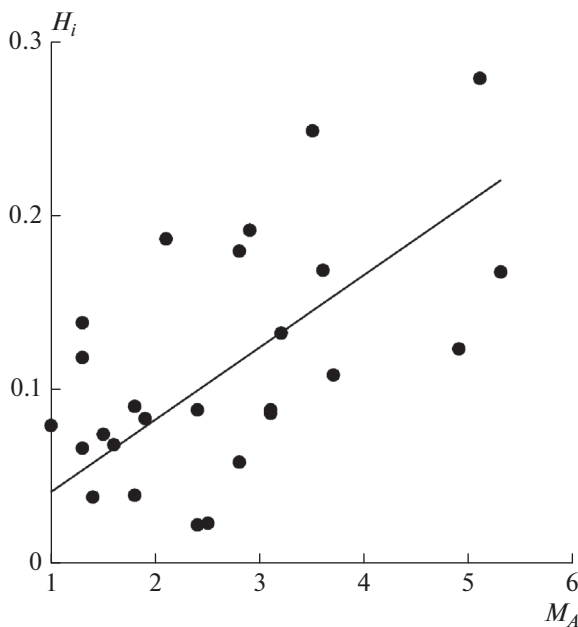


Рис. 3. Зависимость величины овершута в потоке ионов солнечного ветра от числа Маха. Прямая линия — аппроксимации экспериментальных данных.

ных. Видно, что с ростом числа Маха величина овершута, в среднем, возрастает, что подтверждает выводы работ [Livesey et al., 1982; Edmiston and Kennel, 1984; Russell et al., 1982]. Около половины овершутков в потоке ионов была зарегистрирована у межпланетных ударных волн с числами Маха, меньшими, чем значение первого критического числа Маха. Данный результат отражает тот факт, что в формирование структуры фронта ударной волны с числом Маха меньшим, чем первое критическое число Маха, вносят свой вклад отраженные ионы наряду с дисперсией косых магнитозвуковых волн.

В работе [Mellott and Livesey, 1987] было получено, что величина овершута увеличивается с ростом электронного параметра бета β_e . На рисунке 4 показана зависимость величины овершута от параметра бета β_i для нашей базы данных. В среднем, как показано на рис. 4, прослеживается тенденция к увеличению величины овершута с ростом ионного параметра бета β_i , однако разброс точек довольно большой и присутствуют выбивающиеся из зависимости точки.

Как было показано в работе [Gedalin et al., 2015], максимальная амплитуда овершута в магнитном поле определяется величиной магнитного сжатия на фронте волны. На рисунке 5а представлена зависимость амплитуды овершута в магнитном поле от величины магнитного сжатия по данным измерений на КА WIND. На рисунке 5б дана зависимость амплитуды овершута в потоке ионов от скачка плотности ионов на фронте удар-

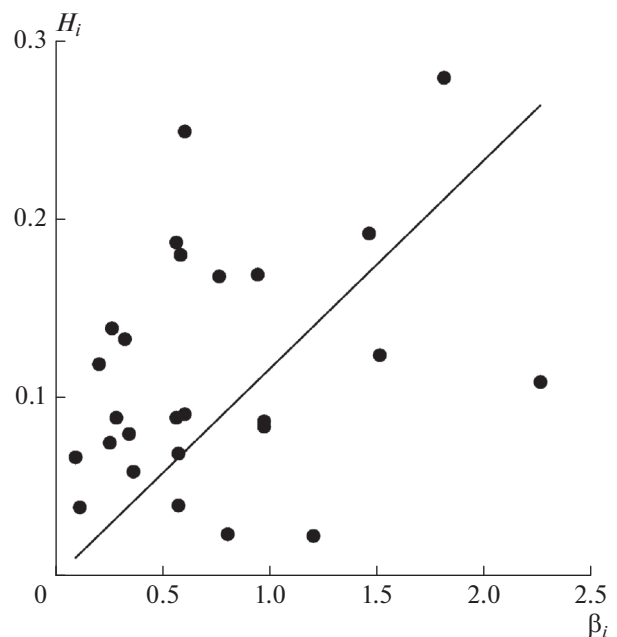


Рис. 4. Зависимость величина овершута в потоке ионов от параметра бета β_i .

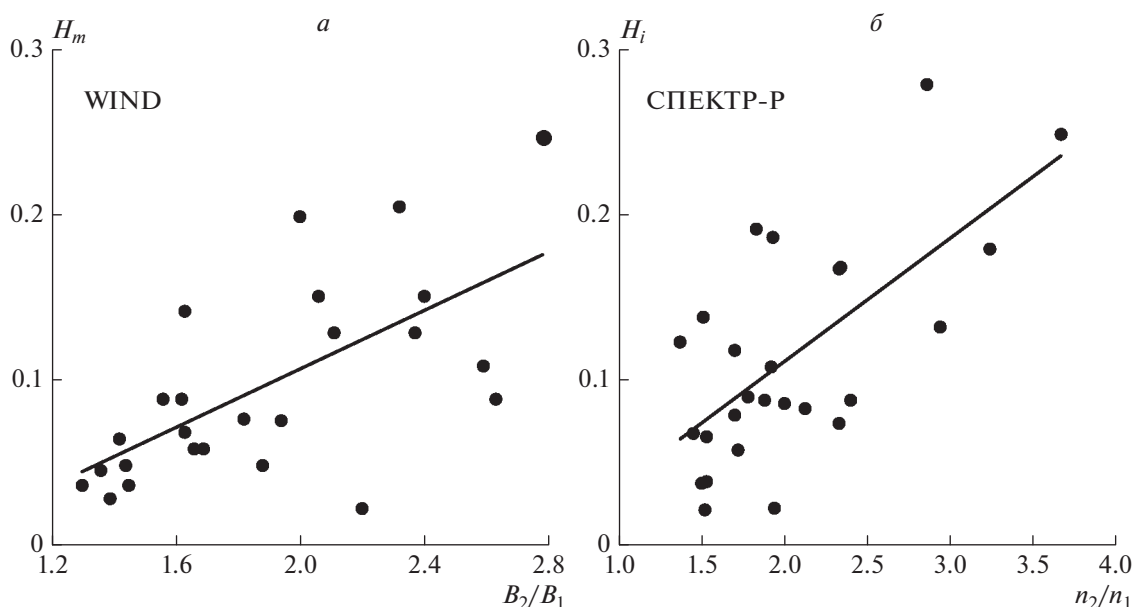


Рис. 5. Зависимость амплитуды овершута в магнитном поле от величины магнитного сжатия (панель а). Зависимость амплитуды овершута в потоке ионов от скачка плотности ионов на фронте ударной волны (панель б).

ной волны по данным прибора БМСВ. Сплошными линиями показаны линейные аппроксимации данных. В среднем, зависимость амплитуды овершута от компрессии прослеживается на обоих графиках рис. 5. Следует отметить большой разброс в данных зависимости амплитуды овершута в магнитном поле. Амплитуда овершута в потоке ионов проявляет более выраженную зависимость от скачка плотности ионов, чем амплитуда овершута в магнитном поле от величины магнитного сжатия.

5. АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ЗА РАМПОМ МУВ

В 31 событии за рампом анализируемых межпланетных ударных волн наблюдались коррелированные, затухающие при удалении от рампа колебания в потоке ионов и магнитном поле. На рисунке 6 приведен пример наблюдения подобных колебаний за рампом квазиперпендикулярной сверхкритической ударной волны, зарегистрированной 17 сентября 2016 г. Сверху вниз показаны временные профили скорости, плотности, температуры протонов и потока ионов солнечного ветра, зарегистрированные на КА СПЕКТР-P (панели а–г) и профили магнитного поля, зарегистрированные на КА DSCOVR (панели д–е). Временное разрешение измерений параметров плазмы составляло 0.031 с, в то время как измерения магнитного поля проводились с частотой 50 Гц. Данные измерений на КА DSCOVR были сдвинуты на 3580.8 с для совпадения с данными измерений на КА СПЕКТР-P. Фронт ударной волны характеризовался следующими параметрами:

альвеновское число Маха $M_A \approx 4.9$, угол $\theta_{\text{Вн}} \approx 82^\circ$, $\beta_i \approx 1.5$. Скорость распространения фронта волны составила 472 км/с.

На профилях параметров плазмы солнечного ветра и модуля магнитного поля выделяется резкое возрастание в 09:18:16 UT, связанное с пересечением рампа, за которым сразу начинаются колебания. Длина волны колебаний по плазменным данным составляет ~ 227 км, по магнитным измерениям ~ 235 км. Таким образом, длина волны колебаний за рампом, определенная по измерениям плазмы солнечного ветра, хорошо совпадает с длиной волны колебаний магнитного поля. Несмотря на значительное расстояние между спутниками, измеренные профили скорости, температуры, плотности, потока ионов и магнитного поля оказались схожими между собой. Следует отметить, что колебания в плазме солнечного ветра и в магнитном поле затухают примерно одновременно в 09:18:30 UT.

Для всех ударных волн с колебаниями за рампом 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. 7а. Из рисунка 7а следует, что длина волны колебаний за рампом, определенная по измерениям потока ионов, в среднем, совпадает с длиной волны колебаний магнитного поля, что подтверждает, что эти колебания являются одинаковыми и имеют один и тот же источник генерации – рамп.

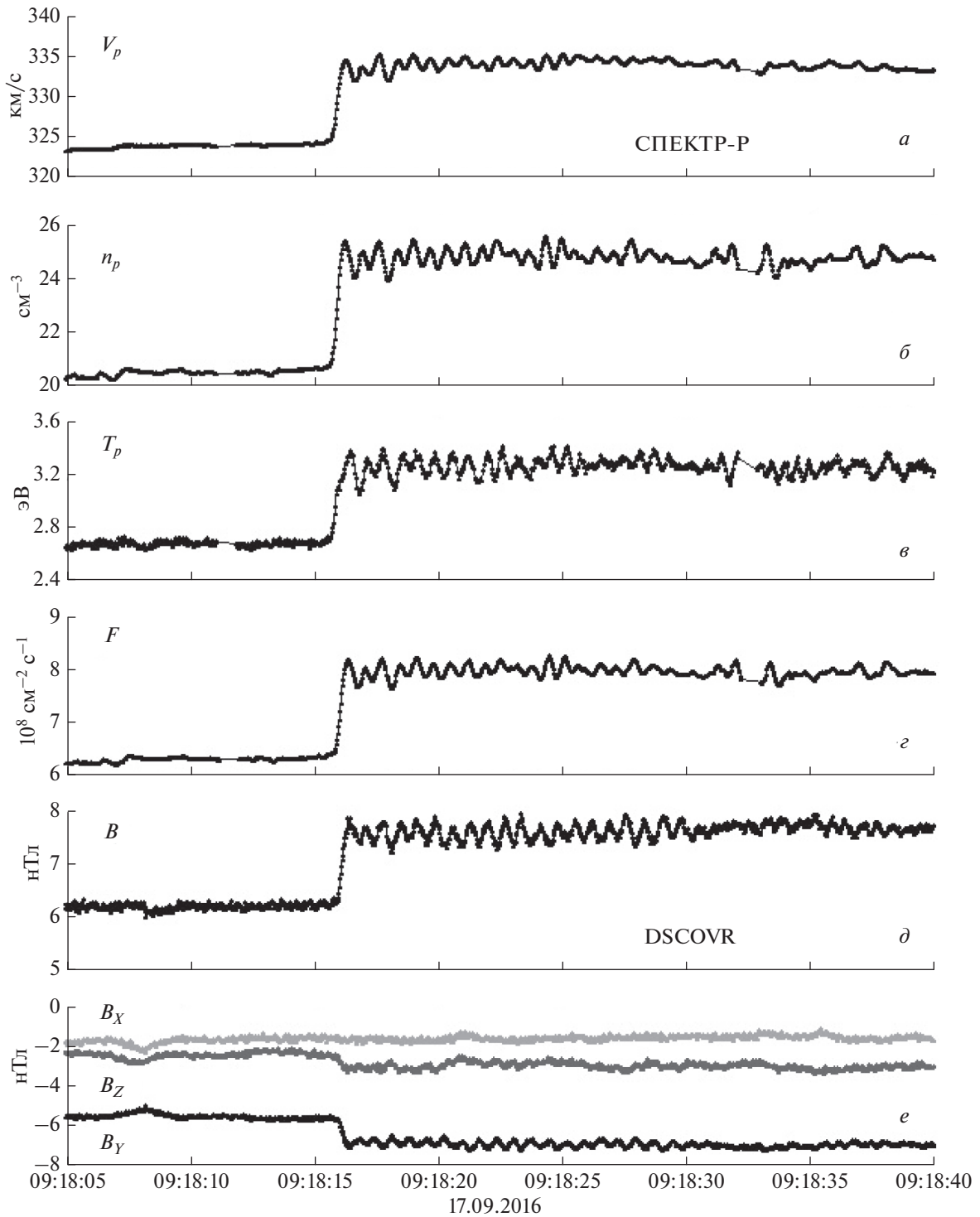


Рис. 6. Временные профили скорости, плотности, температуры и потока ионов солнечного ветра (панели а–г), зарегистрированные на КА СПЕКТР-Р (панели а–г) и магнитного поля, зарегистрированные на КА DSCOVR (панели д–е) 17 сентября 2016 г.

Зависимость оценки длины волны колебаний за ударным фронтом от гирорадиуса ионов показана на рис. 7б. В среднем, как показано на рис. 7б, прослеживается тенденция к увеличению длины

волны колебаний в области овершута с ростом величины гирорадиуса захваченных ионов, как было получено в работах [Vale et al., 2005; Бородкова и др., 2020].

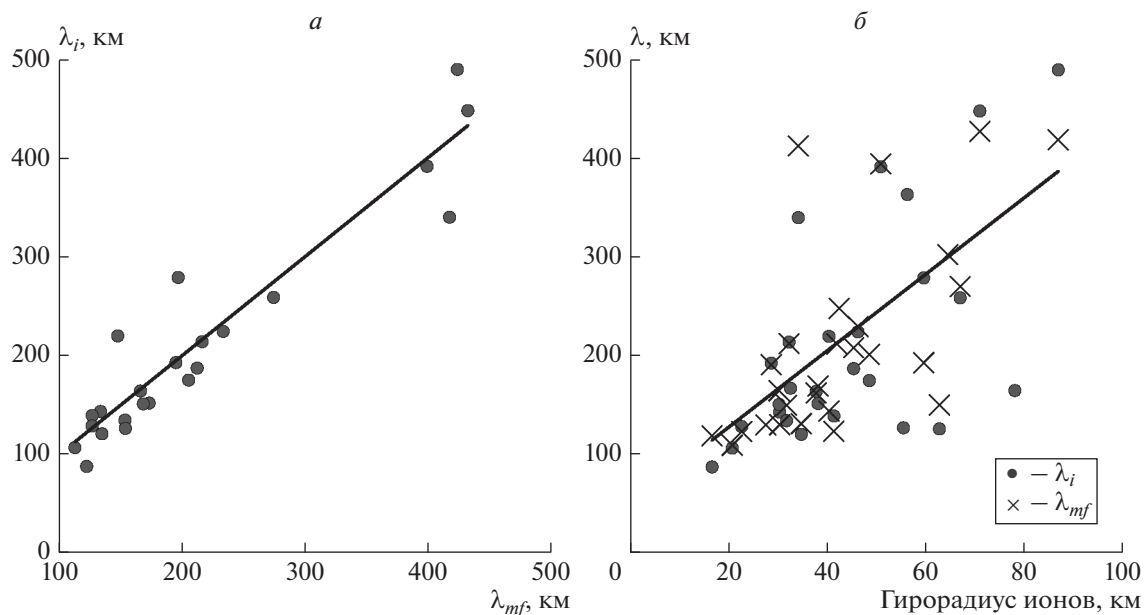


Рис. 7. Зависимость длины волны колебаний потока ионов от длины волны колебаний магнитного поля (панель *a*). Зависимость длины волны колебаний от гирорадиуса ионов (панель *б*). Крестиками показаны величины для магнитного поля, точками – для потока ионов.

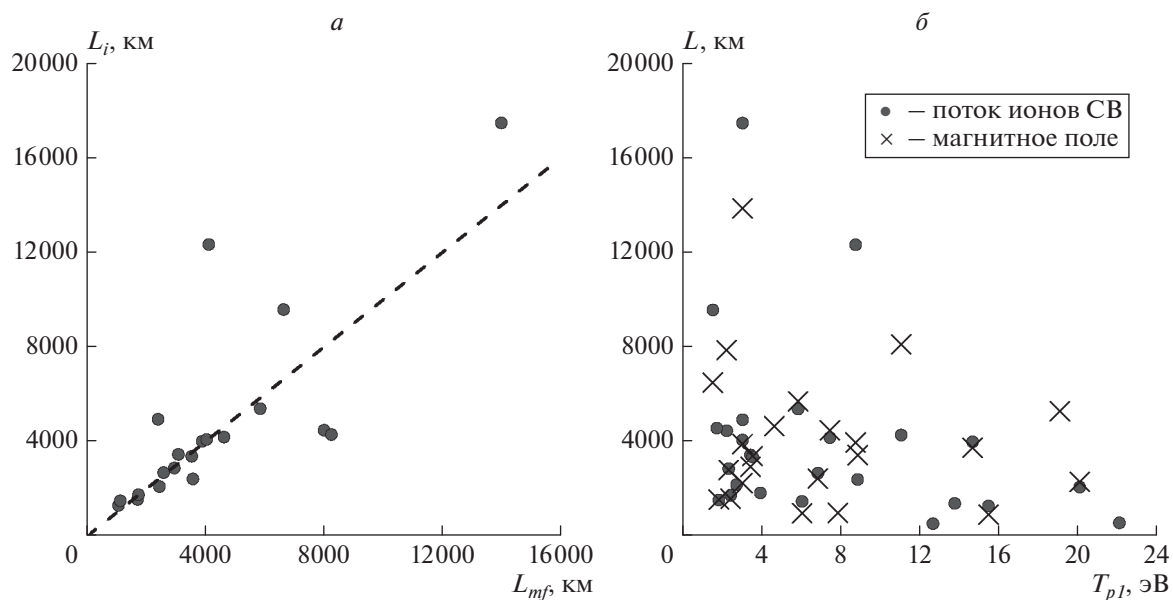


Рис. 8. Зависимость масштаба области затухания колебаний, определенного по магнитному полю, от размера области затухания колебаний, оцененному по параметрам плазмы (панель *a*). Зависимость размера области затухания колебаний от температуры протонов невозмущенного солнечного ветра T_{p1} (панель *б*). Различными символами показаны оценки протяженности областей затухания колебаний, сделанные по наблюдавшимся вариациям в магнитном поле и в потоке ионов.

Зная время затухания колебаний и скорость солнечного ветра за рампом ударной волны, можно определить пространственный масштаб области затухания колебаний, что и было сделано для всех анализируемых ударных волн. На рисунке 8*a* показана зависимость масштаба области затуха-

ния колебаний, определенного по магнитному полю, от размера области затухания колебаний, оцененному по параметрам плазмы. Пунктирная прямая соответствует зависимости $y = x$. Видно, что для большей части событий размеры области затухания колебаний за рампом, определенные

по параметрам плазмы на КА СПЕКТР-Р, совпадают с размерами области затухания колебаний, определенными по магнитному полю на КА WIND. Существующий разброс в значениях указывает на проявление нестационарности фронта ударной волны и процессов, с ним связанных.

В работах [Gedalin et al., 2015, 2020] был сделан вывод о том, что скорость затухания колебаний за рампом волны связана с температурой протонов перед рампом: чем выше температура, тем больше скорость затухания колебаний. Зависимость размера области затухания колебаний от температуры протонов невозмущенного солнечного ветра T_{p1} представлена на рис. 8б. Различными символами показаны оценки протяженности областей затухания колебаний, сделанные по наблюдавшимся вариациям в магнитном поле и в потоке ионов. С одной стороны, как следует из рис. 8б, самые протяженные области затухания колебаний наблюдались при небольшой температуре протонов T_{p1} . В среднем, прослеживается тенденция к увеличению области затухания колебаний с уменьшением температуры протонов T_{p1} . С другой стороны, довольно большой разброс точек не позволяет с уверенностью утверждать о выявленной зависимости скорости затухания колебаний за рампом ударной волны от температуры протонов невозмущенного солнечного ветра.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным прибора БМСВ, установленного на спутнике СПЕКТР-Р, дополненных измерениями магнитного поля на КА WIND и DSCOVR, был проведен анализ связи основных параметров, характеризующих фронт ударной волны, с образованием овершута. Для этого были выделены 26 межпланетных ударных волн, в структуре фронта которых наблюдался овершут в измерениях магнитного поля и потока ионов солнечного ветра. Все ударные волны, кроме одной, были квази-перпендикулярными, имели числа Маха M_A в интервале значений от ~ 1.1 до 5.3 , и параметр бета β_i в диапазоне значений от ~ 0.09 до 2.3 . Для всех ударных волн была сделана оценка величины овершута, как в магнитном поле, так и в потоке ионов, аналогично тому, как это было сделано в работах [Livesey et al., 1982; Бородкова и др. 2020]. Было показано, что в среднем, чем выше величина овершута в магнитном поле, тем больше наблюдается овершут по потоку ионов.

Получено, что с ростом числа Маха величина овершута в потоке ионов, в среднем, возрастает. Этот вывод совпадает с выводами, сделанными в работах [Livesey et al., 1982; Russell et al., 1982; Edmiston and Kennel, 1984; Farris et al., 1993]. Около половины овершотов в потоке ионов солнечного ветра наблюдались у межпланетных ударных волн

с числами Маха, меньшими, чем значение первого критического числа Маха, что указывает на присутствие отраженных ионов, вносящих свой вклад в структуру фронта ударной волны наряду с дисперсией косых магнитозвуковых волн.

Зависимость величины овершута в потоке ионов от параметра бета β_i надежно подтвердить не удалось для нашей базы данных. В среднем, прослеживается тенденция к увеличению величины овершута с ростом параметра бета β_i , однако разброс точек довольно большой.

Получена зависимость максимальной величины овершута в потоке ионов от магнитного сжатия на фронте ударной волны, что соответствует выводам в работы [Gedalin et al., 2015]. Найдено, что амплитуда овершута в потоке ионов солнечного ветра увеличивается с ростом скачка плотности ионов на фронте ударной волны, причем амплитуда овершута в потоке ионов проявляет более выраженную зависимость от скачка плотности ионов, нежели амплитуда овершута в магнитном поле от величины магнитного сжатия.

Таким образом, на формирование и величину амплитуды овершута в структуре фронта ударной волны оказывают существенное влияние угол между нормалью к фронту ударной волны и вектором магнитным полем перед фронтом, число Маха, магнитная и плазменная компрессия на фронте волны.

За фронтом ударных волн наблюдались коррелированные, затухающие при удалении от рампа, колебания потока ионов и магнитного поля, имеющие свойства, присущие сверхкритическим ударным волнам. Длина волны колебаний, определенная по измерениям потока ионов, в среднем, совпала с длиной волны колебаний магнитного поля, что подтверждает, что эти колебания являются одинаковыми и имеют один и тот же источник генерации – рамп. Эти колебания формируются двумя популяциями ионов: втекающим солнечным ветром и пучком отраженных вращающихся ионов, которые, постепенно двигаясь по спирали, перемешиваются и формируют нагретую плазму за ударным фронтом [Omidi et al., 2005].

Получено, что пространственный масштаб области затухания колебаний, определенный по магнитному полю на КА WIND, совпадает с размером области затухания колебаний, определенным по параметрам плазмы на КА СПЕКТР-Р для большей части событий. Колебания потока ионов и магнитного поля могут затухать на масштабах вплоть до $\sim 130\omega_{pi}$. Разброс в значениях проявляется при существенном возрастании размеров области затухания колебаний. Таким образом, длина волны колебаний, определенная по магнитному полю на КА WIND, в среднем, совпадает с длиной волны колебаний, определенной

по потоку ионов на КА СПЕКТР-Р, а протяженности области затухания колебаний различаются при существенном возрастании их размеров.

Обнаружена корреляция между оценкой длины волны колебаний и ионным гирорадиусом. Подобная зависимость длины волны колебаний от гирорадиуса захваченных ионов свидетельствует в пользу интерпретации, предложенной, например, в работах [Omid et al., 2005; Balikhin et al., 2008].

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность NASA CDAWeb (*the Coordinated Data Analysis Web* (<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov>)) и NOAA (<https://www.ngdc.noaa.gov/dscovr>) за возможность использования данных о параметрах плазмы и магнитного поля, измеренных на космических аппаратах WIND, DSCOVR.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 19-02-00177.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бородкова Н.Л., Сапунова О.В., Еселевич В.Г., Застенкер Г.Н., Ермолаев Ю.И. Сравнение магнитных и плазменных овершуттов межпланетных ударных волн // *Космич. исслед.* Т. 58. № 6. С. 1–10. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0023420620060011>
- Еселевич М.В., Еселевич В.Г. Фрактальная структура гелиосферного плазменного слоя на орбите Земли // *Геомагнетизм и аэрономия.* Т. 45. № 3. С. 347–358. 2005.
- Еселевич В.Г., Бородкова Н.Л., Еселевич М.В., Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З., Прех Л. Тонкая структура фронта межпланетной ударной волны по измерениям потока ионов солнечного ветра с высоким временным разрешением // *Космич. исслед.* Т. 55. № 1. С. 32–47. 2017. <https://doi.org/10.7868/S0023420617010034>
- Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З. и др. Быстрые измерения параметров солнечного ветра с помощью прибора БМСВ // *Космич. исслед.* Т. 51. № 2. С. 88–99. 2013. <https://doi.org/10.1134/S0010952513020081>
- Bale S.D., Balikhin M.A., Horbury T.S. et al. Quasi-perpendicular shock structure and processes // *Space Sci. Rev.* V. 118. P. 161–203. 2005. <https://doi.org/10.1007/s11214-005-3827-0>
- Balikhin M.A., Zhang T.L., Gedalin M., Ganushkina N.Y., Pope S.A. Venus Express observes a new type of shock with pure kinematic relaxation // *Geophys. Res. Lett.* V. 35. L01103. 2008. <https://doi.org/10.1029/2007GL032495>
- Borodkova N.L., Eiselevich V.G., Zastenker G.N., Sapunova O.V., Yermolaev Yu.I., Šafránková J., Němeček Z., Přeč L. Fine structure of interplanetary shock front – results from BMSW experiment with high time resolution //

- J. Geophys. Res.* V. 124. 2019. <https://doi.org/10.1029/2018JA026255>
- Burgess D., Wilkinson W.P., Schwartz S.J. Ion distributions and thermalization at perpendicular and quasi-perpendicular supercritical collisionless shocks // *J. Geophys. Res.* V. 94. P. 8783. 1989. <https://doi.org/10.1029/JA094iA07p08783>
- Dimmock A.P., Russell C.T., Sagdeev R.Z. et al. Direct evidence of nonstationary collisionless shocks in space plasmas // *Sci. Adv.* V. 5: eaau9926. 27 February 2019. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau9926>
- Edmiston J.P., Kennel C.F. A parametric survey of the first critical Mach number for a fast MHD shock // *J. Plasma Physics.* V. 32. № 3. P. 429–441. 1984.
- Farris M.H., Russell C.T., Thomsen M.F. Magnetic structure of the low beta, quasi-perpendicular shock // *J. Geophys. Res.* V. 98. P. 15285–15294. 1993.
- 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 P. 83. 1985.
- Gedalin M., Friedman Y., Balikhin M. Collisionless relaxation of downstream ion distributions in low-Mach number shocks // *Phys. Plasmas.* V. 22. 072301. 2015. <https://doi.org/10.1063/1.4926452>
- Gedalin Michael, Zhou Xiaoyan, Russell Christopher T., Angelopoulos Vassilis. Overshoot dependence on the cross-shock potential // *Ann. Geophys.* V. 38. P. 17–26. 2020. <https://doi.org/10.5194/angeo-38-17-2020>
- Gingell I., Schwartz S.J., Burgess D. et al. MMS observations and hybrid simulations of surface ripples at a marginally quasi-parallel shock // *J. Geophys. Res.* V. 77. P. 11003–11017. 2017. <https://doi.org/10.1002/2017JA024538>
- Johlander A., Schwartz S.J., Vaivads A. et al. Rippled quasi-perpendicular shock observed by the Magnetospheric Multiscale Spacecraft // *Phys. Rev. Lett.* V. 117. 165101. 2016. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.165101>
- Kajdič P., Preisser L., Blanco-Cano X., Burgess D., Trotta D. First observations of irregular surface of interplanetary shocks at ion scales by Cluster // *The Astrophys. J. Lett.* 874:L13 (11pp). 2019.
- Kennel C.F., Edmiston J.P., Haeda T. A quarter century of collisionless shock research / In R.G. Stone & B.T. Tsurutani (Eds.), *Collisionless Shocks in Heliosphere: A Tutorial Review.* Geophysical Monograph Series (V. 34, P. 1–36). Washington, DC: American Geophysical Union. 1985.
- Krasnoselskikh V., Balikhin M., Walker S.N. et al. The Dynamic quasiperpendicular shock: Cluster discoveries // *Space Sci. Rev.* V. 178. Issue 2–4. P. 535–598. 2013.
- Lepping R.P., Acuna M.H., Burlaga L.F., Farrell W.M., Slavin J.A., Schatten K.H., Mariani F., Ness N.F., Neubauer F.M., Whang Y.C. The WIND Magnetic Field Investigation // *Space Sci. Rev.* V. 71. P. 207. 1995.
- Leroy M.M., Goodrich C.C., Winske D., Wu C.S., Papadopoulos K. The structure of perpendicular bow shocks // *J. Geophys. Res.* V. 87. P. 5081–5094. 1982.
- 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.* V. 9. P. 1037–1040. 1982.

- *Matthaeus W.H., Weygand J.M., Dasso S.* Ensemble space-time correlation of plasma turbulence in the solar wind // *Phys. Rev. Lett.* V. 116. 245101. 2016.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.245101>
- *Mazelle C., Lembège B., Morgenthaler A., Meziane K., Horbury T.S., Génot V., Lucek E.A., Dandouras I.* Self-reformation of the quasi-perpendicular shock: Cluster observations / *AIP Conference Proceedings.* 1216. P. 471–474. 2010.
<https://doi.org/10.1063/1.3395905>
- *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.
- *Mellott M.M., Livesey W.A.* Shock overshoots revisited // *J. Geophys. Res.* V. 92. P. 13661–13665. 1987.
- *Nemecek Z., Safrankova J., Goncharov O., Prech L., Zastenker G.* Ion scales of quasi-perpendicular low-Mach-number interplanetary shocks // *Geophys. Res. Lett.* V. 40. P. 4133–4137. 2013.
<https://doi.org/10.1002/grl.5081>
- *Ofman L., Balikhin M., Russell C.T., Gedalin M.* Collisionless relaxation of ion distributions downstream of laminar quasi-perpendicular shocks // *J. Geophys. Res.* V. 114. A09106. 2009.
<https://doi.org/10.1029/2009JA014365>
- *Omidi N., Blanco-Cano X., Russell C.T.* Macrostructure of collisionless bow shocks: 1. Scale lengths // *J. Geophys. Res.* V. 110. A12212. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011169>
- *Ramírez Vélez J.C., Blanco-Cano X., Aguilar-Rodríguez E., Russell C.T., Kajdič P., Jian L.K., Luhmann J.G.* Whistler waves associated with weak interplanetary shocks // *J. Geophys. Res.* V. 117. A11103. 2012.
<https://doi.org/10.1029/2012JA017573>
- *Russell C.T., Greenstadt E.W.* Initial ISEE magnetometer results – shock observation // *Space Sci. Rev.* V. 23. P. 3–37. 1979.
- *Russell C.T., Hoppe M.M., Livesey W.A.* Overshoots in planetary bow shocks // *Nature.* V. 296. P. 45–48. 1982.
- *Russell C.T., Jian L.K., Blanco-Cano X., Luhmann J.G.* STEREO observations of upstream and downstream waves at low Mach number shocks // *Geophys. Res. Lett.* V. 36. 03106. 2009.
<https://doi.org/10.1029/2008GL036991>
- *Safrankova J., Nemecek Z., Prech L. et al.* Fast Solar Wind Monitor (BSW): description and first results // *Space Sci. Rev.* V. 175. P. 165–182. 2013.
<https://doi.org/10.1007/s11214-013-9979-4>
- *Skopke N., Paschmann G., Bame S.J., Gosling J.T., Russell C.T.* Evolution of ion distributions across the nearly perpendicular bow shock-specularly and non-specularly reflected-gyrating ions // *J. Geophys. Res.* V. 88. P. 6121–6136. 1983.
[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(94\)00106-B](https://doi.org/10.1016/0273-1177(94)00106-B)
- *Scudder J.D., Mangeney A., Lacombe C., Harvey C.C., Aggson T.L., Anderson R.R., Gosling J.T., Paschmann G., Russell C.T.* The resolved layer of a collisionless, high beta, supercritical, quasi-perpendicular shock wave: 1. Rankine-Hugoniot geometry, currents, and stationarity // *J. Geophys. Res.* V. 91. P. 11019–11052. 1986.
<https://doi.org/10.1029/JA091iA10p11019>
- *Weygand J.M., Matthaeus W.H., Kivelson M.G., Dasso S.* Magnetic correlation functions in the slow and fast solar wind in the Eulerian reference frame // *J. Geophys. Res.* V. 118. P. 3995–4004. 2013.
<https://doi.org/doi:10.1002/jgra.50398>
- *Wilson L.B., Koval A., Szabo A. et al.* Observations of electromagnetic whistler precursors at supercritical interplanetary shocks // *Geophys. Res. Lett.* V. 39. L08109. 2012.
<https://doi.org/10.1029/2012GL051581>
- *Wilson L.B., Koval A., Szabo A., Stevens M.L., Kasper J.C., Cattell C.A., Krasnoselskikh V.V.* Revisiting the structure of low-Mach number, low-beta, quasi-perpendicular shocks // *J. Geophys. Res.* V. 122. № 9. P. 9115–9133. 2017.
<https://doi.org/10.1002/2017JA024352>