

УДК 523.62-726

ПОВЕДЕНИЕ ИОНОВ He^{++} НА ФРОНТЕ МЕЖПЛАНЕТНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

© 2020 г. О. В. Сапунова^{1, *}, Н. Л. Бородкова¹, Г. Н. Застенкер¹, Ю. И. Ермолаев¹¹Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

*e-mail: sapunova_olga@mail.ru

Поступила в редакцию 28.02.2020 г.

После доработки 21.03.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

Исследованы вариации параметров дважды ионизированных ионов гелия He^{++} плазмы солнечного ветра при прохождении фронта межпланетной ударной волны. Используются данные измерений прибора БМСВ – Быстрый Монитор Солнечного Ветра, установленного на спутнике СПЕКТР-Р. По данным этого прибора вычислены параметры ионов He^{++} : скорость, температура, абсолютная и относительная концентрация. Выявлено, что абсолютная концентрация ионов He^{++} за фронтом межпланетной ударной волны увеличивается, а относительная падает. Средняя относительная концентрация ионов He^{++} за фронтом ударной волны оказалась немного меньше (на 9%), чем в невозмущенной области. Получена корреляция изменения относительной концентрации ионов He^{++} с параметром $\theta_{\text{Вп}}$: чем меньше $\theta_{\text{Вп}}$, тем сильнее падает относительная концентрация ионов He^{++} за фронтом межпланетной ударной волны.

DOI: 10.31857/S0016794020060127

1. ВВЕДЕНИЕ

Межпланетные ударные волны (МУВ), генерируемые при солнечных вспышках и выбросах коронального вещества и распространяющиеся в солнечном ветре, являются одним из главных переносчиков возмущения от Солнца к Земле [Vorigini et al., 1982; Volkmer and Neubauer, 1985; Borodkova, 1986]. При прохождении фронта МУВ резко изменяются все параметры плазмы солнечного ветра – скорость, температура, концентрация и магнитное поле. Известно, что двумя главными компонентами ионного состава солнечного ветра являются протоны и дважды ионизированные ионы гелия (He^{++} или α -частицы). При этом доля однократно ионизированных ионов гелия в солнечном ветре не превышает тысячных долей от содержания ионов He^{++} и в данной работе не рассматривается.

Вариации параметров протонов и ионов He^{++} и относительного содержания ионов He^{++} напрямую связаны со свойствами верхней короны Солнца и механизмами формирования в ней солнечного ветра. Поэтому важным вопросом является определение относительного содержания гелия по отношению к основной (протонной) компоненте [Ogilvie and Wilkerson, 1969; Formisano et al., 1970; Ермолаев, 1994].

Таким образом, исследование межпланетных ударных волн и поведения различных компонент солнечного ветра при их распространении стано-

вятся взаимосвязанными задачами, направленными на решение одной проблемы. Изучение поведения ионов He^{++} на фронте ударной волны и его взаимодействия с ней было начато еще в работе [Gosling et al., 1978], после чего данный вопрос исследовался как по экспериментальным данным, так и при помощи моделирования [Scholer and Terasawa, 1990; Scholer, 1990; Trattner and Scholer, 1991].

С запуском прибора БМСВ в составе эксперимента ПЛАЗМА-Ф на спутнике СПЕКТР-Р стало возможным изучение тонкой структуры фронта МУВ благодаря высокому временному разрешению прибора – 0.031 с для модуля и направления потока ионов солнечного ветра и 1 с для скорости, температуры и концентрации ионов. Таким образом, появилась возможность рассмотреть поведение компоненты ионов He^{++} при пересечении МУВ спутником СПЕКТР-Р с временным разрешением 1 с. Целью данной работы является изучение вариаций содержания ионов He^{++} на фронте межпланетной ударной волны [Nemesek, 2013; Застенкер и др., 2013; Safrankova et al., 2013; Еселевич, 2017].

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Для исследования использовались данные, полученные с помощью прибора БМСВ, функци-

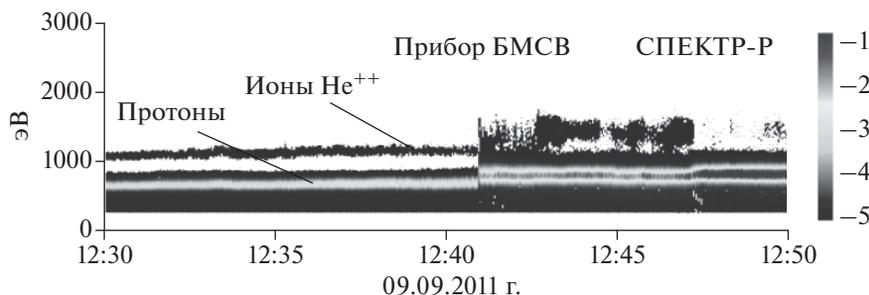


Рис. 1. Пример визуализации данных прибора БМСВ для события 9 сентября 2011 г.

онировавшего с августа 2011 г. до 2019 г. 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).

Временное разрешение прибора БМСВ составляло 0.031 с для величины и направления потока плазмы солнечного ветра и 1 с для скорости, температуры и концентрации протонов и ионов He⁺⁺. Также в ряде случаев был доступен режим измерения скорости, температуры и концентрации протонов с разрешением 0.031 с. Детальное описание приведено в работах [Nemesek, 2013; Застенкер и др., 2013; Safrankova et al., 2013; Еселевич, 2017].

Для анализа поведения межпланетного магнитного поля вблизи фронта ударных волн использовались данные с временным разрешением 0.092 с, полученные с помощью прибора MFI на спутнике WIND, расположенном, как правило, в солнечном ветре около первой точки либрации. Кроме того, для сравнения поведения протонов и ионов He⁺⁺ солнечного ветра в разных точках пространства, использовались данные, полученные с помощью прибора 3DP с временным разрешением 3 с.

3. ПРИМЕРЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИОНОВ He⁺⁺ С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРА БМСВ

За период функционирования прибора БМСВ было зарегистрировано 57 межпланетных ударных волн, для которых был исследован временной ход основных параметров плазмы солнечного ветра, а также рассчитаны магнитозвуковое число Мах M_{MS} , угол θ_{BN} между направлением вектора магнитного поля перед фронтом и нормалью к фронту волны и параметр бета β_p — отношение газового давления к магнитному.

Параметры плазмы солнечного ветра были дополнены измерениями магнитного поля магни-

тометром MFI на спутнике WIND (в ряде случаев были взяты данные измерений со спутников THEMIS-B/THEMIS-C, Cluster 1–4), временное разрешение которых составляет 0.092 с.

Пример регистрации межпланетной ударной волны с явно различимым потоком ионов He⁺⁺ приведен на рис. 1, где показаны динамические спектры потока плазмы солнечного ветра, зарегистрированные прибором БМСВ. На динамических спектрах отчетливо выделяются две популяции, обозначенные стрелками, — протонов и ионов He⁺⁺ до, во время, и после прохождения ударной волны. По данным прибора БМСВ можно выделить распределение ионов He⁺⁺, если температура и скорость протонов невелики. При невысоких температурах ионов кривая зависимости тока датчика от напряжения, которую измеряет прибор БМСВ, дает два отдельных пика — протонный (на отметке в ~ 500 В) и ионов He⁺⁺ (примерно на 1000 В) пики, как это показано на рис. 2 сплошными серыми линиями. За фронтом межпланетной ударной волны происходит ускорение и нагрев плазмы солнечного ветра, в результате чего протонный пик и пик ионов He⁺⁺ расширяются и смещаются вправо на кривой зависимости тока датчика от напряжения. Так как измеряемый диапазон энергий ограничивался 3 кэВ, то пик ионов He⁺⁺ мог смещаться за пределы измеряемого диапазона энергий.

Таким образом, было отобрано 20 межпланетных ударных волн, для которых можно было выделить поток ионов He⁺⁺ в течение прохождения фронта. Для каждой волны были посчитаны параметры протонов и ионов He⁺⁺: скорость, температура и концентрация (для ионов He⁺⁺ — как абсолютное, так и относительное значение по отношению к концентрации протонов). Для этого была написана программа обработки данных прибора БМСВ с фокусом на расчет параметров ионов He⁺⁺.

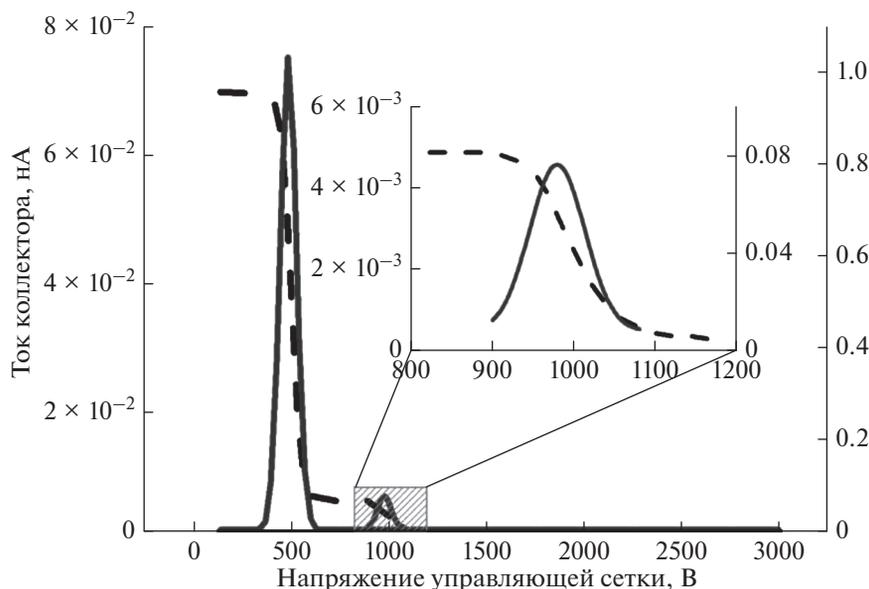


Рис. 2. Пример четкого наблюдения пика ионов He^{++} , 3-х секундный спектр датчика прибора БМСВ.

4. СРАВНЕНИЕ ВЕЛИЧИН, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ДАННЫМ РАЗНЫХ СПУТНИКОВ

Пример временного хода основных параметров плазмы солнечного ветра и магнитного поля при прохождении МУВ 9 июля 2017 г. приведен на рис. 3, где показаны временные профили плотности, температуры, скорости протонов солнечного ветра, зарегистрированные на КА СПЕКТР-Р (панели *a–в*) и модуль магнитного поля, зарегистрированный на КА WIND (панель *г*). На профилях выделяются следующие структурные особенности фронта: рампы, длительностью ~ 0.34 – и 0.35 с, опережающий его пучок затухающих колебаний, с длиной волны, имеющей временной масштаб ~ 0.37 – 0.47 с и пучок затухающих колебаний за фронтом волны с временным размером длины волны ~ 0.64 – 0.84 с. Пример иллюстрирует хорошее согласие величин, полученных на двух разнесенных в пространстве спутниках для одной и той же МУВ: длительности наблюдения рампы и длительности колебаний перед и за рампом, определенные по параметрам плазмы солнечного ветра и по магнитному полю, совпадают.

На рисунке 4 представлен пример сравнения концентрации (абсолютной – для протонов и ионов He^{++} , относительной – для ионов He^{++}), полученной по данным спутников СПЕКТР-Р и WIND для самой первой МУВ в нашей базе данных – 9 сентября 2011 г. Наблюдается общее хорошее согласие измеренных параметров, в частности – заметное понижение относительной концентрации ионов He^{++} сразу после фронта МУВ.

5. ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ИОНОВ He^{++} ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ МУВ

При прохождении фронта МУВ изменяются параметры протонов и ионов He^{++} солнечного ветра. Пример изменения параметров протонов и ионов He^{++} солнечного ветра – концентрации, скорости и температуры, а также магнитного поля, представлен на рис. 5. Видно небольшое понижение средней относительной концентрации ионов He^{++} сразу после прохождения фронта МУВ. Скорость ионов He^{++} оказалась, в среднем, несколько (примерно на 7%) меньше скорости протонов как перед, так и после фронта, а температура ионов He^{++} в 2 раза превышает температуру протонов.

На рисунке 6 приведено распределение абсолютной и относительной концентрации ионов He^{++} для всех событий до и после прохождения фронта. Можно отметить, что после прохождения фронта МУВ абсолютные величины меняются достаточно заметно, в частности, среднее значение концентрации ионов He^{++} увеличивается примерно в 2 раза. Однако, ввиду не менее сильного увеличения концентрации протонов за фронтом МУВ, относительная концентрация ионов He^{++} меняется незначительно.

Так как общая статистика оказалась малоинформативной, решено было рассмотреть изменение относительной концентрации ионов He^{++} при прохождении фронта МУВ в зависимости от величин β_p , $\theta_{\text{Вн}}$ и M_{MS} . Результаты приведены на рис. 7. Можно отметить отсутствие явной зависимости изменения относительной концентрации

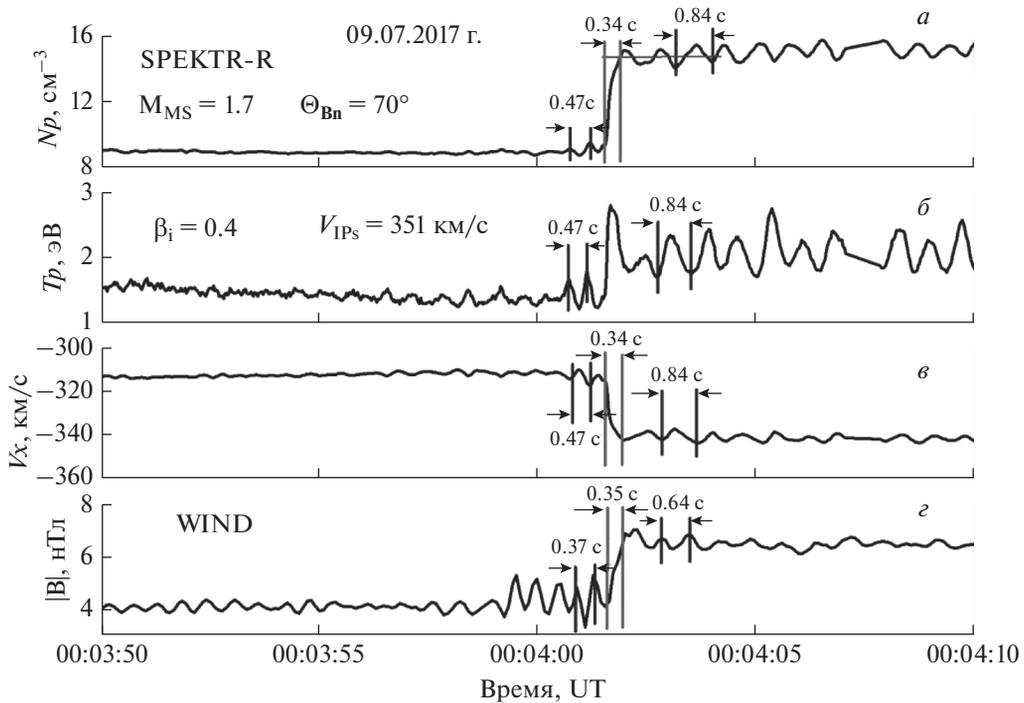


Рис. 3. Временной ход параметров плазмы и магнитного поля во время прохождения МУВ 9 июля 2017 г. Сверху—вниз: концентрация (а), температура (б) и скорость (в) потока протонов (вдоль направления Земля—Солнце), модуль магнитного поля (г).

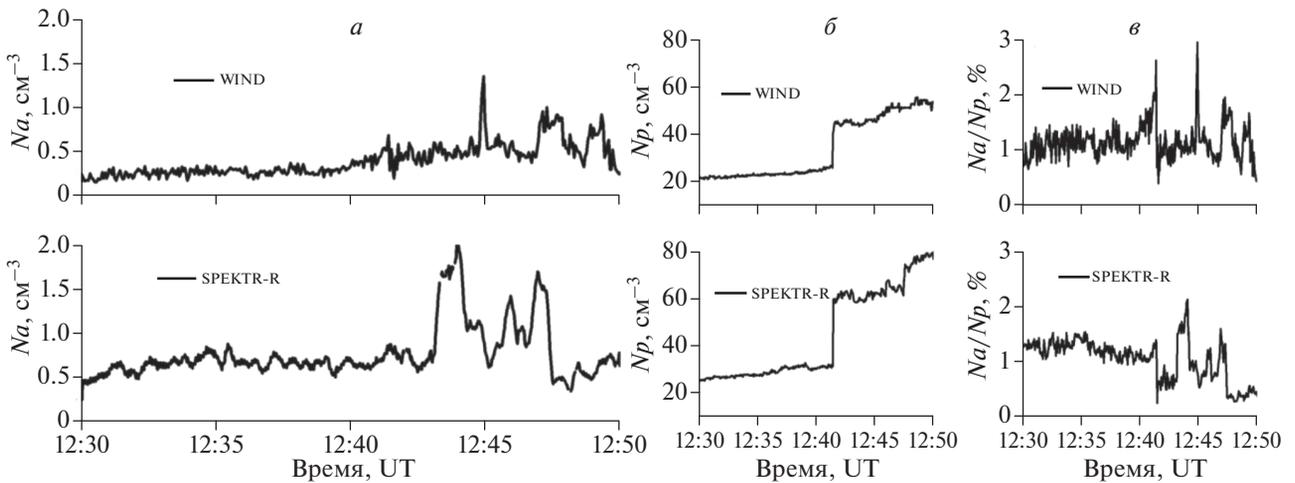


Рис. 4. Поведение концентрации протонов и ионов He⁺⁺ по данным спутников СПЕКТР-Р и WIND во время события 9 сентября 2011 г.: абсолютная концентрация ионов He⁺⁺ (а); абсолютная концентрация протонов (б); относительная концентрация ионов He⁺⁺ (в).

ионов He⁺⁺ от параметра β_p (рис. 7б). Как при малых, так и при больших значениях параметра β_i возможно большое или незначительное изменение относительной концентрации ионов He⁺⁺. Также нет четкой корреляции и с параметром M_{MS} (рис. 7в). Однако если исключить событие с большим значением параметра ($M_{MS} = 5.8$), то су-

ществует тенденция к падению относительной концентрации ионов He⁺⁺ за фронтом МУВ при увеличении M_{MS} . Этот вопрос требует дальнейшего исследования.

Переходя к рассмотрению графика зависимости изменения относительной концентрации ионов He⁺⁺ от угла θ_{Bn} (рис. 7а), можно заметить

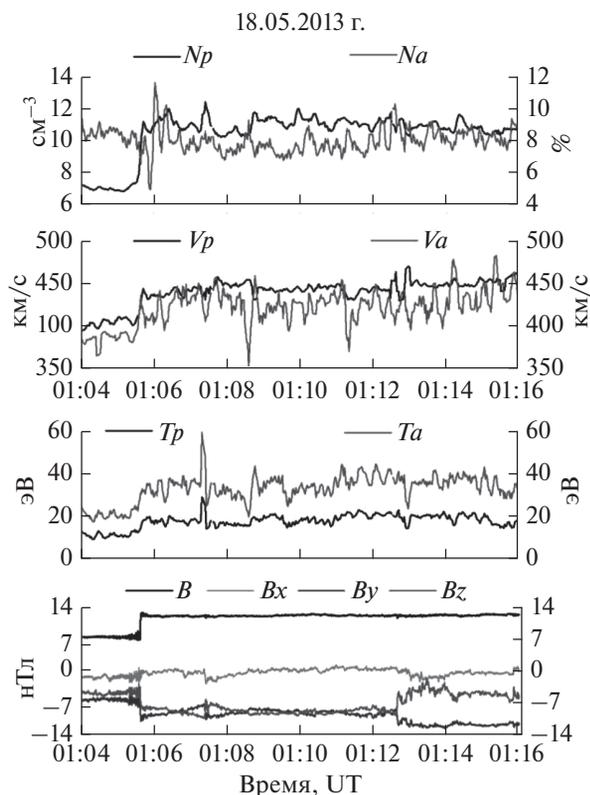


Рис. 5. Параметры плазмы солнечного ветра во время прохождения МУВ 18 мая 2013 г.

явную корреляцию. Чем меньше угол $\theta_{\text{Вп}}$, тем больше падает рассматриваемая величина. Иными словами за фронтом квазипараллельной МУВ

относительная концентрация ионов He^{++} упадет гораздо сильнее (в 2–2.5 раза), чем за фронтом квазиперпендикулярной МУВ.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Падение относительной концентрации ионов He^{++} за фронтом МУВ при переходе к квазипараллельной МУВ может быть связано с истечением части ионов из возмущенной области в невозмущенную сквозь рампы МУВ благодаря уменьшению угла $\theta_{\text{Вп}}$, в результате чего такой переход становится более эффективным. В исследовании [Trattner and Scholer, 1991] проведено моделирование поведения отраженных ионов He^{++} в случае квазипараллельной МУВ. Отмечена диффузия в невозмущенную область части ионов (как протонов, так и He^{++}), при этом относительное содержание ионов He^{++} в отраженном потоке может быть сравнимо с таковым в невозмущенном солнечном ветре. Данный результат согласуется с наблюдаемой на рис. 7а зависимостью – в случае квазипараллельной МУВ значительная часть ионов He^{++} может перейти в невозмущенную область, из-за чего падает относительная концентрация ионов He^{++} за фронтом МУВ. Результаты работы [Gosling et al., 1978], позволяющие предположить, что механизм ускорения низкоэнергичных ионов на квазипараллельной МУВ может быть односторонним, что также может объяснить полученный результат. Для более детального изучения данного вопроса необходимо увеличить статистику наблюдения квазипараллельных МУВ.

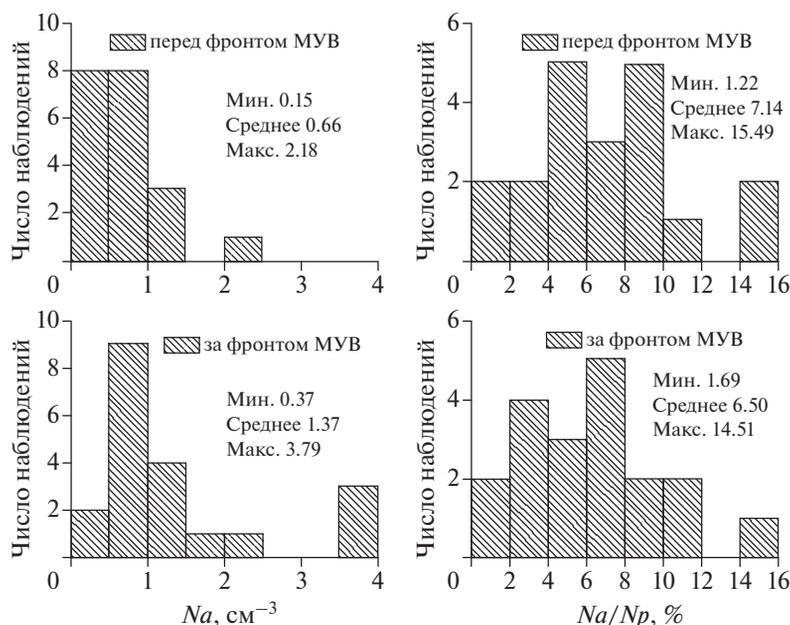


Рис. 6. Статистика величины абсолютной (слева) и относительной (справа) концентрации ионов He^{++} в невозмущенном и возмущенном солнечном ветре.

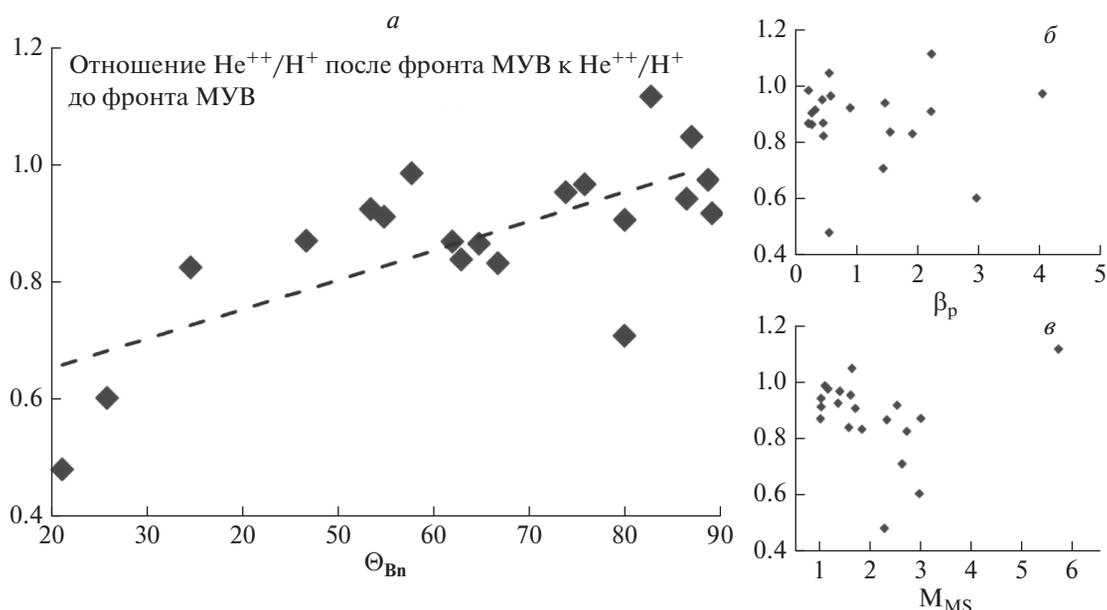


Рис. 7. Зависимость изменения относительной концентрации He⁺⁺ при прохождении фронта МУВ от параметров θ_{Bn} (а), β_p (б), и M_{MS} (в).

В случае квазиперпендикулярной МУВ увеличение относительного содержания ионов He⁺⁺ за фронтом МУВ может быть объяснено как затрудненностью диффузии ионов поперек вектора магнитного поля, так и изменением механизмов нелинейного укручения фронта МУВ.

Вопрос о поведении относительной концентрации ионов He⁺⁺ в случае МУВ с большим числом магнитозвукового Маха остается открытым ввиду недостаточного количества подходящих для рассмотрения событий.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя данные прибора БМСВ, были подсчитаны параметры ионов He⁺⁺ (скорость, температура, концентрация абсолютная и относительная) для 20-ти межпланетных ударных волн. Было показано, что средняя относительная концентрация ионов He⁺⁺ за фронтом межпланетной ударной волны немного меньше (~на 9%), чем в невозмущенной области, при этом максимальное значение этого параметра оказалось даже меньше за фронтом МУВ. Следует еще раз отметить, что это не относится к абсолютному значению концентрации ионов He⁺⁺. Для более подробного рассмотрения поведения относительной концентрации ионов He⁺⁺ были построены графики зависимости данной величины от параметров β_i , M_{MS} и угла θ_{Bn} . Не было замечено явной зависимости изменения относительной концентрации ионов He⁺⁺ от параметров β_i и M_{MS} , однако выяв-

лена корреляция с углом θ_{Bn} : чем меньше значение угла θ_{Bn} , тем сильнее падает относительная концентрация ионов He⁺⁺ за фронтом МУВ.

8. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность NASA CDAWEB за возможность использования данных о параметрах плазмы и магнитного поля, измеренных на спутниках WIND, Cluster.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда грант № 16-12-10062.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ермолаев Ю.И. Наблюдения ионов He⁺⁺ в солнечном ветре // Космич. исслед. Т. 32. № 1. С. 93–125. 1994.
- 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 ионов солнечного ветра с высоким временным разрешением // Космич. исслед. Т. 55. № 1. С. 32–47. 2017.
- Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З. и др. Быстрые измерения параметров солнечного ветра с помощью прибора БМСВ. // Космич. исслед. Т. 51. № 2. С. 83–175. 2013.
- Borodkova N.L., Vaisberg O.L., Zastenker G.N. Interplanetary shock waves in the post solar maximum year period

- (January–July, 1981) // *Adv. Space Res.* V. 6. № 6. P. 327–330. 1986.
- *Borrini G., Gosling J.T., Bame S.J., Feldman W.C.* An Analysis of shock wave disturbances observed at 1 AU from 1971 through 1978 // *J. Geophys. Res.* V. 87. № A6. P. 4365–4373. 1982.
- *Formisano V., Palmiotto F., Moreno G.* α -particle observations in the solar wind // *Solar Phys.* V. 15. № 2. P. 479–498. 1970.
- *Gosling J.T., Asbridge J.R., Bame S.J., Paschmann G., Sckopke N.* Observation of two distinct population of bow shock ions in the upstream solar wind // *Geophys. Res. Lett.* V. 5. P. 957–960. 1978.
- *Nemecek Z., Safrankova J., Goncharov O., Prech L., Zastenker G.N.* Ion scales of quasi-perpendicular interplanetary shocks // *Geophys. Res. Lett.* V. 40. № 16. P. 4133–4137. 2013. <https://doi.org/10.1002/grl.50814>
- *Ogilvie K.W., Wilkerson T.D.* Helium abundance in the solar wind // *Solar Phys.* V. 8. № 2. P. 435–449. 1969.
- *Safrankova J., Nemecek Z., Prech L. et al.* Fast Solar Wind Monitor (BMSW): Description and First Results // *Space Sci. Rev.* V. 175. № 1–4. P. 165–182. 2013.
- *Scholer M., Terasawa T.* Ion reflection and dissipation at quasiparallel collisionless shocks // *Geophys. Res. Lett.* V. 17. P. 119–122. 1990.
- *Scholer M.* Diffusions at quasi-parallel collisionless shocks: simulations // *Geophys. Res. Lett.* V. 17. P. 1821–1824. 1990.
- *Trattner K.J., Scholer M.* Diffuse alpha particles upstream of simulated quasi-parallel supercritical collisionless shocks // *Geophys. Res. Lett.* V. 18. № 10. P. 1817–1820. 1991.
- *Volkmer P.M., Neubauer F.M.* Statistical properties of fast magnetoacoustic shock waves in the solar wind between 0.3 AU and 1 AU: Helios-1, 2 observations // *Ann. Geophys.* V. 3. № 1. P. 1–12. 1985.