

О РОЛИ ИОННОЙ ВЕЙБЕЛЕВСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ФОРМИРОВАНИИ ФРОНТА ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ЗЕМЛИ

Кропотина Ю.А.¹, Петрукович А.А.², Чугунова О.М.², Быков А.М.¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

ON THE ROLE OF THE ION WEIBEL INSTABILITY IN THE FORMATION OF THE EARTH BOW SHOCK FRONT

Kropotina J.A.¹, Petrukovich A.A.², Chugunova O.M.², Bykov A.M.¹

¹Ioffe Institute, Saint Petersburg, Russia

²IKI RAS, Moscow, Russia

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-191-194>

We study the nature of strong magnetic field oscillations in the vicinity of the Earth bow shock in regions of low interplanetary magnetic field. A hybrid kinetic model is compared to MMS observations. We show that with a magnetic field about 1 nT the shock front is formed mostly due to the ion Weibel instability, while with a magnetic field about 8.5 nT the impact of this instability is negligible. In the latter case the ratio of magnetic variation to the upstream magnetic field is an order less than that in the former.

Введение

На участках фронта головной ударной волны Земли со слабым (порядка 1 нТ) межпланетного поля могут наблюдаться сильные колебания магнитного поля и плотности [1–4]. При этом временной ряд, измеряемый спутником, создаёт иллюзию пересечения протяжённого фронта ударной волны с быстрыми осцилляциями магнитного поля и плотности плазмы от значений перед фронтом до значений за фронтом (рис. 1).

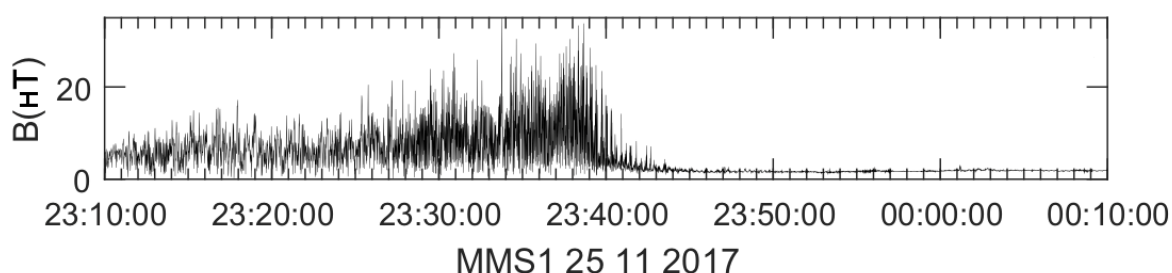


Рис. 1. Наблюдения головной ударной волны спутником MMS в период слабого межпланетного магнитного поля ~1 нТ.

Однако численное моделирование [5] показало, что фронт ударной волны с такими параметрами компактный (порядка протонного гирорадиуса), а изменение параметров плазмы вдоль нормали к фронту практически ламинарное. Наблюдаемые осцилляции магнитного поля объясняются

ионной вейбелевской неустойчивостью, возникающей в подножии ударной волны при взаимодействии встречных пучков ионов. В результате раскачки неустойчивости появляются нитевидные структуры, вытянутые вдоль нормали к фронту и движущиеся вместе с плазмой со скоростью выше альвеновской. Таким образом, спутник наблюдает локальное изменение параметров плазмы при движении этих структур вдоль фронта ударной волны.

Однако схожая картина может наблюдаться и при более сильном межпланетном магнитном поле (до ~ 8.5 нТ, рис. 2). Это поднимает вопрос о том, при каких параметрах может развиваться ионная вейбелевская неустойчивость, а также какие неустойчивости могут приводить к такой наблюдательной картине. Согласно линейной теории, при усилении магнитного поля ионная вейбелевская неустойчивость переходит в альвеновскую ионно-циклотронную, которая генерирует волны с меньшей амплитудой и отличной от нуля фазовой скоростью в системе покоя плазмы.

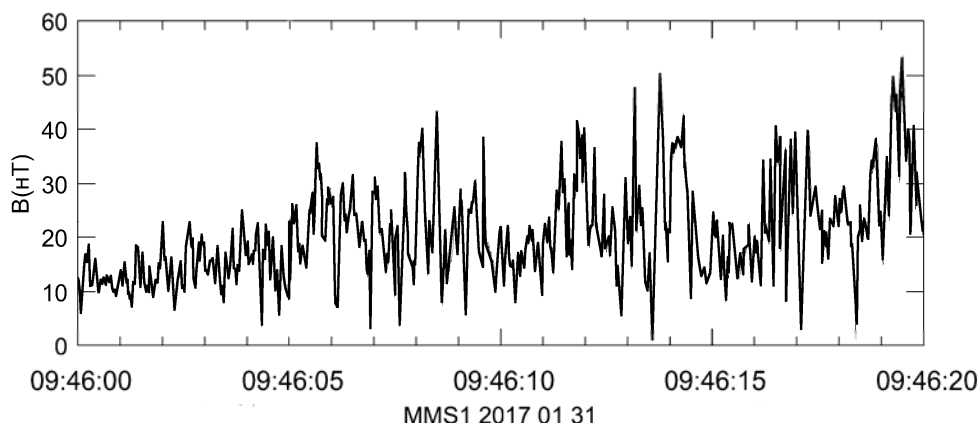


Рис. 2. Наблюдения спутником MMS головной ударной волны с межпланетным магнитным полем ~ 8.5 нТ.

В данной работе мы строим гибридную кинетическую модель головной ударной волны для случая $B = 8.5$ нТ и показываем, что при наблюдаемых параметрах ударной волны ионная вейбелевская неустойчивость присутствует в подножии ударной волны, но не является доминирующей.

Моделирование и результаты

При помощи гибридного кинетического кода «Maximus» [6], в котором решается система уравнений Власова-Максвелла на декартовой сетке, была создана трёхмерная модель участка фронта головной ударной волны в приближении плоской геометрии. Ударная волна возникала при отражении потока плазмы от проводящей стенки, имитирующей магнитосферу Земли.

Параметры перед фронтом ударной волны были взяты из наблюдений: магнитное поле B_0 , направленное под углом 50 градусов к нормали к

фронту и равное 8,5 нТ; концентрация электронов 8 см^{-3} ; температура протонов 552000 К; температура электронов 190000 К; альвеновское число Маха $M_a=10$. Цветовая карта магнитного поля вблизи фронта смоделированной ударной волны показана на рис. 3. Косые нитевидные структуры перед фронтом ($x \approx 1250\text{--}1500 \text{ км}$) возникают вследствие ионной вейбелевской неустойчивости, развивающейся при взаимодействии налетающих протонов с отражёнными от фронта.

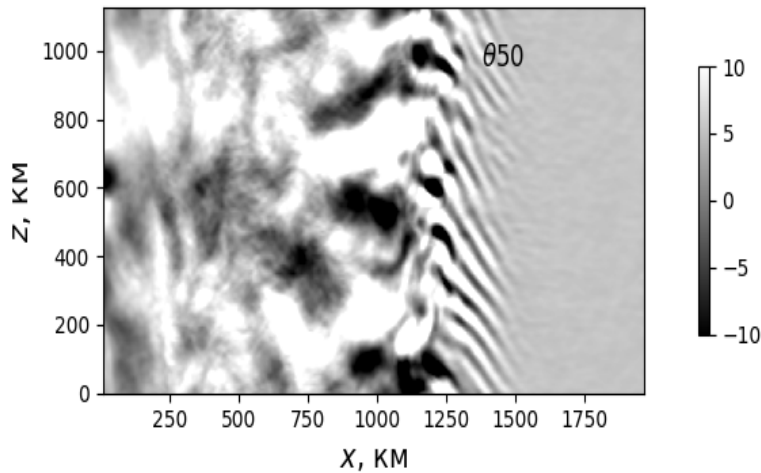


Рис. 3. Смоделированная структура фронта головной ударной волны.

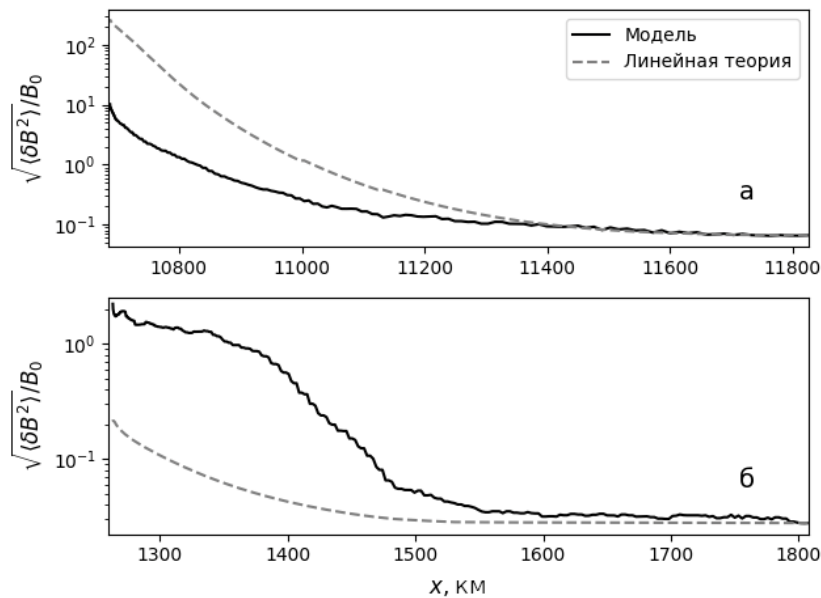


Рис. 4. Сравнение смоделированного роста вариации магнитного поля на фронте с предсказаниями линейной теории в случае а) $B_0 = 1 \text{ нТ}$; б) $B_0 = 8,5 \text{ нТ}$

Гибридная модель позволяет непосредственно вычислить параметры налетающего и отражённого пучков и при помощи линейной теории найти инкремент неустойчивости в каждой точке. Таким образом, можно предсказать рост вариации магнитного поля при приближении к фронту удар-

ной волны в предположении, что осцилляции возникают вследствие ионной вейбелевской неустойчивости. Результат линейного анализа сравнивается с гибридной моделью на рис. 4 для случая $B_0 = 1$ нТ (а) и $B_0 = 8,5$ нТ (б). Видно, что в первом случае инкремент вейбелевской неустойчивости достаточно велик, чтобы полностью объяснить рост вариации магнитного поля при приближении к фронту (предсказания линейной теории начинают превышать результаты моделирования при относительной вариации около 10%, что объясняется некорректностью линейной теории при высоких амплитудах волн). Однако в случае $B_0 = 8,5$ нТ вариация магнитного поля значительно превышает предсказания линейной теории даже в области применимости последней. Отношение вариации магнитного поля к его значению перед фронтом при этом на порядок меньше. Таким образом, можно сделать вывод, что в этом случае вейбелевская неустойчивость не является доминирующей. Существенный вклад в формирование фронта могут вносить другие типы неустойчивостей, например, альвеновская ионно-циклотронная или зеркальная.

Литература

1. Petrukovich A.A., Chugunova O.M. // Journal of Geophysical Research (Space Physics), 2021, 126, e29004
2. Petrukovich A.A., Chugunova O.M., Shustov P.I. // Annales Geophysicae, 2019, 37, 877
3. Sundberg T., Burgess D., Scholer M., et al. // ApJ, 2017, 836, L4
4. Bohdan A., Pohl M., Niemiec J., et al. // ApJ, 2020, 893, 6
5. Kropotina J.A., Petrukovich A.A., Chugunova O.M., Bykov A.M. // MNRAS, 2023, 524, 2934
6. Kropotina J., Bykov A., Krassilchtchikov A., Levenfish K., in Voevodin V., Sobolev S., eds., Supercomputing. Springer International Publishing, Cham, 2019, p. 242