

Взаимодействие электромагнитной турбулентности в форшоке с головной ударной волной Земли Глобальная гибридная модель

Ю.А. Кропотина, А.М. Быков

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №25-72-20007

Форшок головной ударной волны Земли — область надтепловых частиц и интенсивной электромагнитной турбулентности перед квазипродольными участками фронта.

В данной работе с помощью **глобальной 2D гибридной модели** магнитосферы (ионы — частицы, электроны — жидкость) исследованы свойства низкочастотных волн в форшоке при межпланетном магнитном поле, направленном от Солнца к Земле.

Волны распространяются в двух направлениях под углом к нормали, создавая картину наподобие **ряби на воде**. В результате их укрупнения и наложения максимумов перед фронтом возникают структуры типа **SLAMS** и **шоклетов**.

Продемонстрирован механизм проникновения возмущений за фронт ударной волны в магнитослой: области повышенной плотности **«прорывают» фронт**, приводя к неровностям фронта (ripples) и проходя внутрь магнитосферы.

Возникающие в магнитослое длинноволновые возмущения скоррелированы по времени с волнами в форшоке и могут служить источником **Pc3 геомагнитных пульсаций**.

Введение

- Форшок возникает перед квазипродольными участками фронта УВ (угол $\theta_{Bn} < 45^\circ$)
- Населен надтепловыми частицами и плазменными волнами
- Спектр определяет коэффициент диффузии частиц (ускорение Ферми I порядка)
- Проникновение волн за фронт $\rightarrow$ причина РсЗ пульсаций

Цель работы

- Исследовать свойства волн в форшоке
- Определить механизм проникновения волн за фронт
- Показать влияние на турбулентность в магнитослое

Новизна: Впервые продемонстрирован механизм прорыва фронта плотной структурой.

Глобальная гибридная модель магнитосферы

Гибридный подход

- Ионы — частицы (уравнения движения)
- Электроны — безмассовая нейтрализующая жидкость
- Сетка с разрешением порядка инерционной длины иона d_i

Нормированная система уравнений

$$\frac{d\vec{r}_k}{dt} = \vec{v}_k \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{v}_k}{dt} = \frac{Z_k}{A_k} \left(\vec{E} + \vec{v}_k \times \vec{B} \right) - \frac{\nu}{\rho_c} (\vec{j}_i - \vec{j}_e) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E} \quad (3)$$

$$\vec{E} = -\frac{1}{\rho_c} (\vec{j}_e \times \vec{B} + \nabla P_e - \nu(\vec{j}_i - \vec{j}_e)) \quad (4)$$

Геометрия и границы

- 2D диполь ($B \propto 1/r^2$)
- Декартова сетка GSE
- Размер по y — одна ячейка, периодические гран. условия
- Открытые границы по x и z

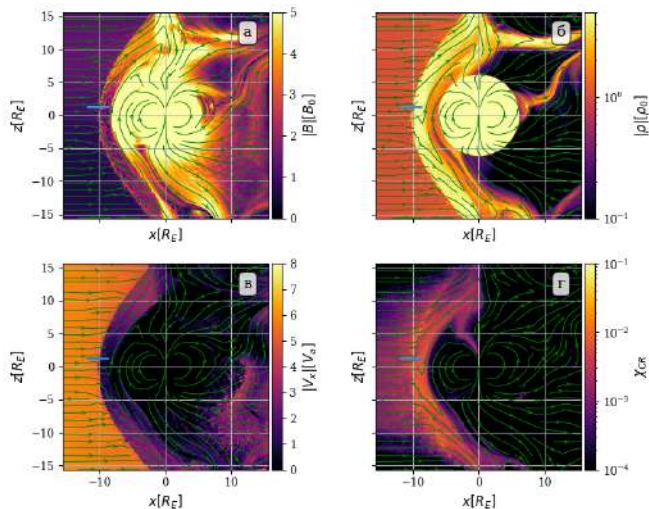
Физические параметры

- $M_a = 6$, $\beta_i = \beta_e = 0.44$
- $R_E = 80d_i$ (реалистичный размер)
- ММП направлено от Солнца к Земле
- Плазмосфера: $\rho_f = \rho_0 e^{-0.7R/R_E}$,
 $R < 6R_E$

Диссипация

$\nu = \nu_0 |j| \equiv \nu_0 |\text{rot } \vec{B}|$ — аномальная вязкость

Рис. 1. Структура головной ударной волны

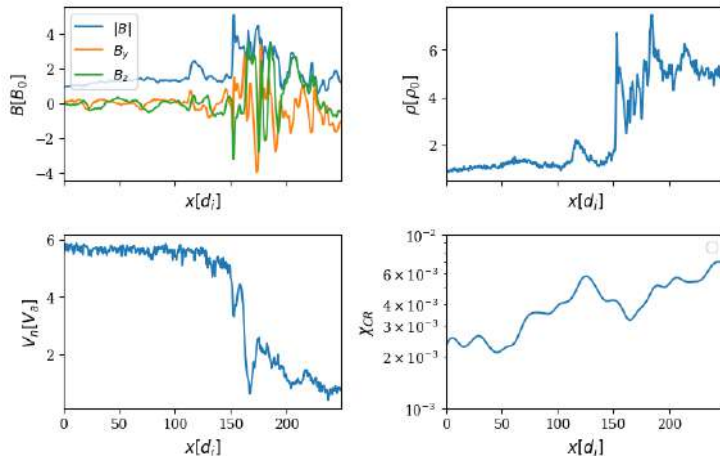


Цветом показаны:

- (а) $|B|$,
- (б) плотность ρ ,
- (в) скорость V_x ,
- (г) плотность надтепловых частиц χ_{CR} ($E > 10$ КэВ).

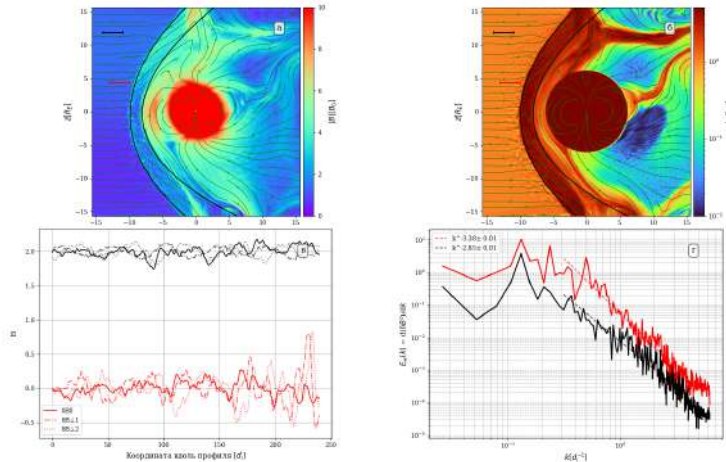
Величины нормированы на значения в солнечном ветре. Длины в R_E .

Рис. 2. Профили вдоль среза



Координата вдоль профиля нормирована на инерционную длину протона d_i .
Видна структура SLAMS при $x \approx 120 d_i$.

Рис. 3. Спектры электромагнитных флуктуаций



- Спектр может быть аппроксимирован степенной функцией с показателем ~ 3
- Длины волн до $\sim 1R_E = 80d_i$

Свойства волн в форшоке

- **Сжимаемость** ($\delta\rho \neq 0$) $\Rightarrow$ не альфвеновская турбулентность
- **Наклонные фронты** волн пересекаются $\rightarrow$ *рябь на воде*
- **Наложение максимумов** $\rightarrow$ SLAMS & shocklets
- **Длины волн** $\lesssim 1R_E = 80d_i$ (низкочастотные)
- Для надтепловых частиц $kR_B > 1$ (R_B — ларморовский радиус) $\Rightarrow$ нерезонансные флуктуации
- Вблизи фронта $\delta B/B \sim 1 \Rightarrow$ нелинейный режим
- Спектр $\sim k^{-3}$

Ключевой вывод

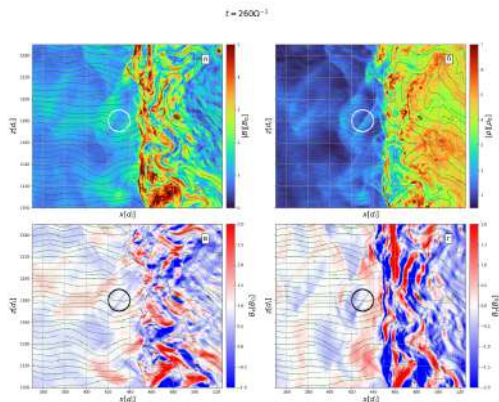
Нелинейные сжимаемые волны в форшоке достигают амплитуд $\delta B/B \sim 1$ и порождают локализованные структуры.

Механизм проникновения: прорыв фронта

Механизм:

- 1 Узкая область повышенной плотности подходит к фронту
- 2 Она «прорывает» фронт УВ
- 3 Возникают неровности фронта (ripples)
- 4 Магнитное поле вытягивается — усиление B_x
- 5 Вмороженность и сохранение магнитного потока

Результат: Длинноволновые возмущения в магнитослое, скоррелированные с волнами в форшоке → Рс3 пульсации

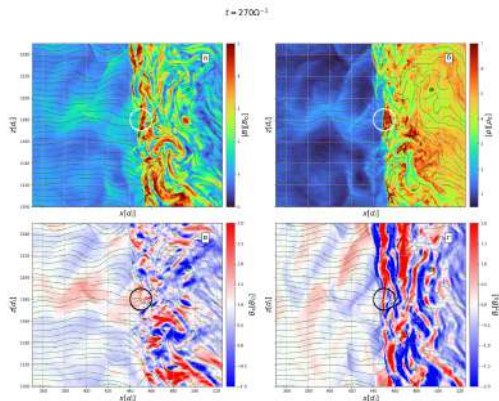


Механизм проникновения: прорыв фронта

Механизм:

- 1 Узкая область повышенной плотности подходит к фронту
- 2 Она «прорывает» фронт УВ
- 3 Возникают неровности фронта (ripples)
- 4 Магнитное поле вытягивается — усиление B_x
- 5 Вмороженность и сохранение магнитного потока

Результат: Длинноволновые возмущения в магнитослое, скоррелированные с волнами в форшоке → Рс3 пульсации

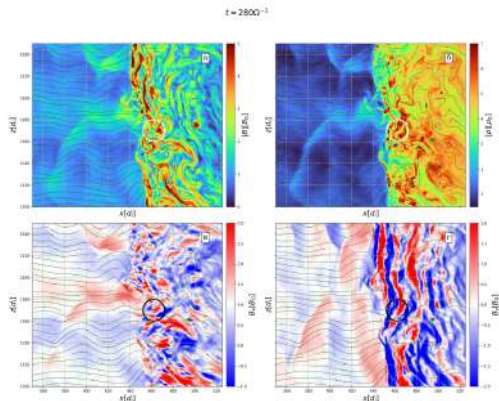


Механизм проникновения: прорыв фронта

Механизм:

- 1 Узкая область повышенной плотности подходит к фронту
- 2 Она «прорывает» фронт УВ
- 3 Возникают неровности фронта (ripples)
- 4 Магнитное поле вытягивается — усиление B_x
- 5 Вмороженность и сохранение магнитного потока

Результат: Длинноволновые возмущения в магнитослое, скоррелированные с волнами в форшоке → Рс3 пульсации

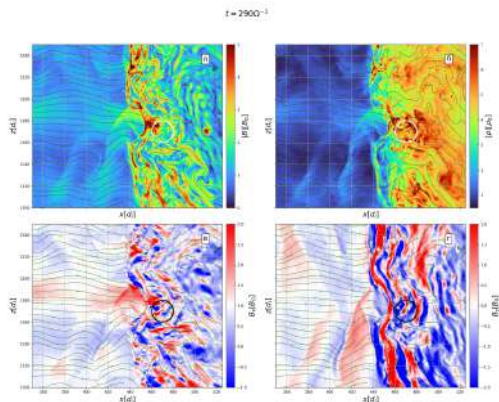


Механизм проникновения: прорыв фронта

Механизм:

- 1 Узкая область повышенной плотности подходит к фронту
- 2 Она «прорывает» фронт УВ
- 3 Возникают неровности фронта (ripples)
- 4 Магнитное поле вытягивается — усиление B_x
- 5 Вмороженность и сохранение магнитного потока

Результат: Длинноволновые возмущения в магнитослое, скоррелированные с волнами в форшоке → Рс3 пульсации

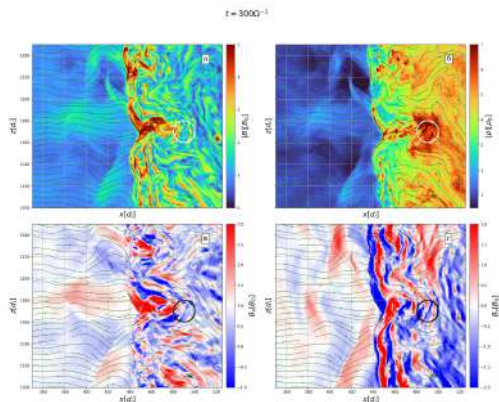


Механизм проникновения: прорыв фронта

Механизм:

- 1 Узкая область повышенной плотности подходит к фронту
- 2 Она «прорывает» фронт УВ
- 3 Возникают неровности фронта (ripples)
- 4 Магнитное поле вытягивается — усиление B_x
- 5 Вмороженность и сохранение магнитного потока

Результат: Длинноволновые возмущения в магнитослое, скоррелированные с волнами в форшоке → Рс3 пульсации

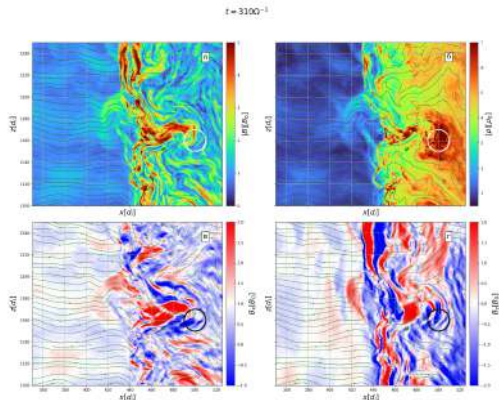


Механизм проникновения: прорыв фронта

Механизм:

- 1 Узкая область повышенной плотности подходит к фронту
- 2 Она «прорывает» фронт УВ
- 3 Возникают неровности фронта (ripples)
- 4 Магнитное поле вытягивается — усиление B_x
- 5 Вмороженность и сохранение магнитного потока

Результат: Длинноволновые возмущения в магнитослое, скоррелированные с волнами в форшоке → Рс3 пульсации

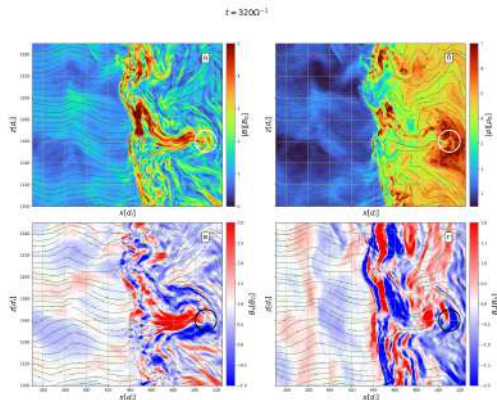


Механизм проникновения: прорыв фронта

Механизм:

- 1 Узкая область повышенной плотности подходит к фронту
- 2 Она «прорывает» фронт УВ
- 3 Возникают неровности фронта (ripples)
- 4 Магнитное поле вытягивается — усиление B_x
- 5 Вмороженность и сохранение магнитного потока

Результат: Длинноволновые возмущения в магнитослое, скоррелированные с волнами в форшоке → Рс3 пульсации



Заключение

Основные результаты

- Турбулентность в форшоке — сжимаемая, неальфвеновская, нелинейная ($\delta B/B \sim 1$)
- В результате укрупнения и наложения максимумов косых сжимаемых волн вблизи фронта возникают **SLAMS** и **шоклеты** — локализованные нелинейные структуры
- Спектр магнитной турбулентности близок к степенному с показателем ~ 3

Предложенный механизм

- Прорыв фронта плотными плазменными структурами обеспечивает перенос турбулентности в магнитослой
- Вытягивание магнитных петель и усиление B_x за счет вмороженности

Значимость

Результаты объясняют генерацию **Pc3** геомагнитных пульсаций и имеют значение для астрофизики ударных волн.

Спасибо за внимание!

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №25-72-20007

email: juliett.k@gmail.com