

Генерація іонно-циклotronних хвиль в подіях перенесення потоку

М. В. Івченко¹, Я. Бленцкі²

¹Національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

²Центр космічних досліджень Польської академії наук, Варшава, Польща

Надійшла до редакції 30.05.96

За загальновизнаною моделлю подій перенесення потоку є відкритими трубками магнітного поля, що виникли в результаті нестационарного локального переоб'єднання магнітного поля на денній магнітопаузі Землі. Хвильові спостереження свідчать про наявність характерних автографів цих явищ. Одним з цих автографів є підвищена інтенсивність низькочастотних електростатичних хвиль, спектр яких має характерні максимуми поблизу гармоній ларморівської частоти іонів. В даній роботі пропонується механізм генерації іонно-циклotronних хвиль за рахунок відносного руху електронів та іонів плазми переходної області. Електрони переходної області прискорюються в напрямку до Землі для компенсації струму гарячих електронів магнітосфери, які швидко витікають до переходної області. Інкремент нестійкості становить порядка 0.5 с^{-1} .

ВСТУП

Події перенесення потоку (ППП — в англомовній літературі Flux Transfer Events, FTE) вперше спостерігалися Russel and Elphic (1979) при аналізі даних супутників ISEE-1, -2. Події мали характерні автографи у вимірах магнітного поля. Поблизу магнітопаузи Землі спостерігалися значні (з амплітудою порядку 10 нТл і більше) біполлярні відхилення нормальної до магнітопаузи складової магнітного поля, значення якої більшість часу дорівнює нулю (магнітне поле всередині манітосфери є замкненим). Найбільш поширеним поясненням цих явищ є модель відкритої трубки магнітного поля, яка виходить з магнітосфери до переходної області.

Рис. 1, запозичений з цитованої праці, ілюструє концепцію. Магнітне поле огортає відкриту силову трубку, і супутник реєструватиме відповідний біполлярний автограф. ППП рухається відносно супутника з швидкістю порядку швидкості плазми переходної області — близько 70 км/с. Характерна тривалість явища — близько 2 хв, з чого можна зробити висновок щодо масштабу ширини трубки вздовж магнітопаузи — вона станов-

ить близько одного радіуса Землі. Такого ж порядку і товщина трубки ППП в нормальному до магнітопаузи напрямку.

Статистичні властивості ППП (наприклад, Berchem, Russell, 1984; Kawano et al., 1992; Rijnbeek et al., 1984) свідчать про наявність зв'язку цих явищ з переоб'єднанням магнітного поля на денній магнітопаузі. Дійсно, події перенесення потоку спостерігаються лише під час періодів з південною складовою магнітного поля у переходній області. В ППП спостерігається плазма, що є сумішшю гарячої та розрідженої магнітосферної плазми та холодної густої плазми переходної області.

ППП реєструються, головним чином, в екваторіальній області денної магнітопаузи, хоча це може бути пов'язано з тим, що їх ідентифікація ведеться за допомогою автографа у вимірах магнітного поля, який може мати інший вигляд на високих широтах або на флангах магнітопаузи. Цікавими в цьому відношенні є дослідження проявів подій перенесення потоку в хвильових спостереженнях, пошук їхніх хвильових автографів. Зокрема, використання хвильових спостережень разом з плазмовими даними дозволяє виділяти ППП на нічному боці магнітопаузи (Blecki et al., 1990).

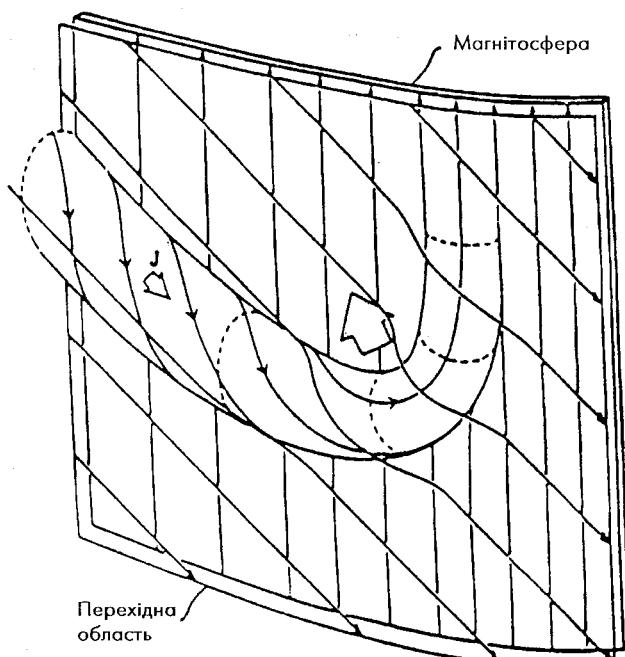


Рис. 1. Найбільш поширенна модель ППП

СПОСТЕРЕЖЕННЯ ХВИЛЬОВОЇ АКТИВНОСТІ В ППП

В подіях перенесення потоку спостерігаються наступні види хвиль (Blecki et al., 1987, 1990; Anderson et al., 1982; LaBelle et al., 1987): магнітні флуктуації на частотах нижче іонної ларморівської частоти з амплітудою близько 1 нТл; флуктуації електричного поля з частотами від декількох герц до сотень герц з амплітудою порядку кількох мілівольтів на метр з перпендикулярною поляризацією на найнижчих частотах; широкосмугові сплески в діапазоні від 100 Гц до 10 кГц та сплески хвиль на електронній плазмовій частоті поблизу країв подій.

Хвилі найнижчих частот мають найбільшу амплітуду, і майже вся енергія хвиль лежить в області частот нижче 30 Гц. Тому вони є найбільш цікавими. Перпендикулярна поляризація цих хвиль може свідчити про їх генерацію перпендикулярним струмом (внаслідок модифікованої двоструменевої нестійкості або нижньогібридної дрейфової нестійкості). Але з іншого боку, для розвитку нижньогібридної дрейфової нестійкості необхідні значні градієнти (з характерним розміром 250 км), які досить рідко спостерігаються в подіях перенесення потоку, головним чином поблизу країв подій. Згідно із спостереженнями хвильова активність не пов'язана з наявністю градієнтів. Крім того, як показують чисельні розв'язки (див. нижче) поляризація під значними кутами до магнітного поля

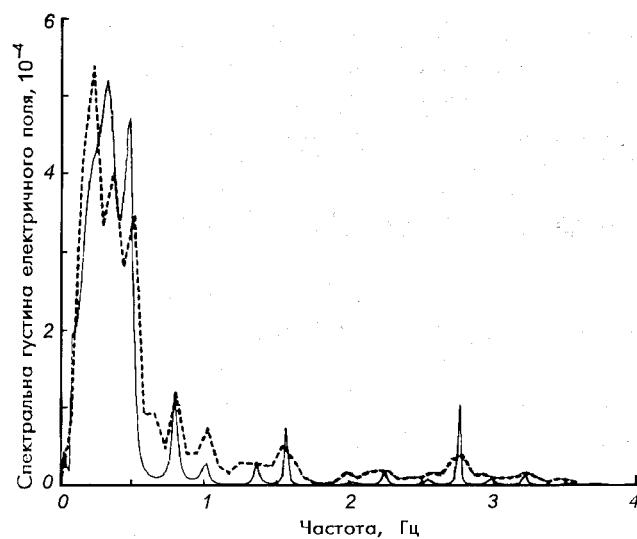


Рис. 2. Спектр низькочастотних хвиль в ППП

можлива і для інших типів нестійкостей.

На рис. 2 наведено спектр низькочастотних хвиль в ППП за спостереженнями супутника «Прогноз-8» (Blecki et al., 1990). Ці результати добре узгоджуються з загальною картиною хвильових спостережень в подіях перенесення потоку. Цікавими є максимуми спектра поблизу іонно-циклотронних гармонік (ларморівська частота іонів в ППП близька до 1 Гц).

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ НЕСТАЙКОСТЕЙ В ППП

Для чисельного аналізу розв'язувалося дисперсійне рівняння для багатокомпонентної плазми з максвеллівськими функціями розподілу в магнітному полі в електростатичному наближенні. Воно має вигляд (Ситенко, Мальнєв, 1994):

$$1 + \sum_j K_j(\mathbf{k}, \omega) = 0.$$

Тут діелектричні сприйнятливості для компонентів:

$$K_j(\mathbf{k}, \omega) = \frac{k_j^2}{k^2} \left[1 + \sum_{m=\infty}^{\infty} \exp(-\lambda_j) I_m(\lambda_j) Z(\zeta_j^m) \zeta_j^0 \right],$$

де \mathbf{k} — хвильовий вектор, k_j — дебаївський хвильовий вектор для j -го компонента,

$$\lambda_j = k_{\perp}/k_{Lj}^2,$$

$$\zeta_j^m = \frac{\omega - k_z V_{0j} - m\omega_{ci}}{\sqrt{2} |k_z| V_j},$$

I_m — модифікована функція Бесселя індекса m , $V_j =$

$= \sqrt{T_j/m_j}$, $Z(\xi_j^m)$ — дисперсійна функція плазми (plasma dispersion function) (Schmitt, 1974).

Для описання процесу змішування магнітосферної плазми з плазмою переходної області на відкритих силових лініях ППП пропонується такий сценарій (схематично основні його елементи наведені на рис. 3). Гаряча плазма витікає з магнітосфери з швидкостями порядку теплових швидкостей компо-

нентів. Іоni рухаються з швидкістю порядку кількох сотень км/с, електрони — кількох тисяч км/с. Якби не було плазми переходної області на тих же лініях магнітного поля, внаслідок розділення зарядів електрони загальмувалися б, і відбувалося б відоме явище амбіполярної дифузії. Наявність плазми переходної області дає можливість нейтралізації сумарного струму за рахунок її елек-

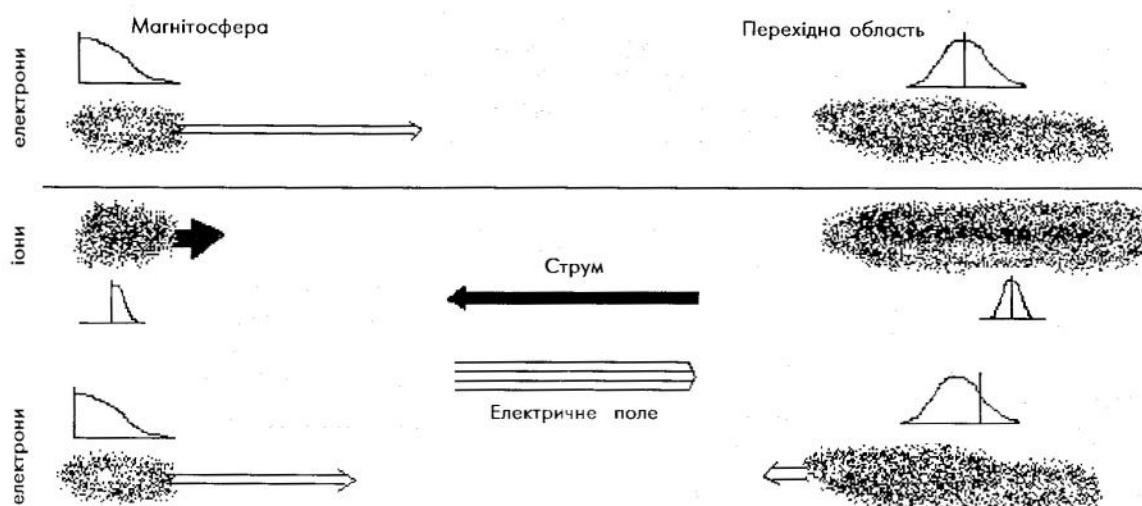


Рис. 3. Схема руху плазмових компонентів у ППП

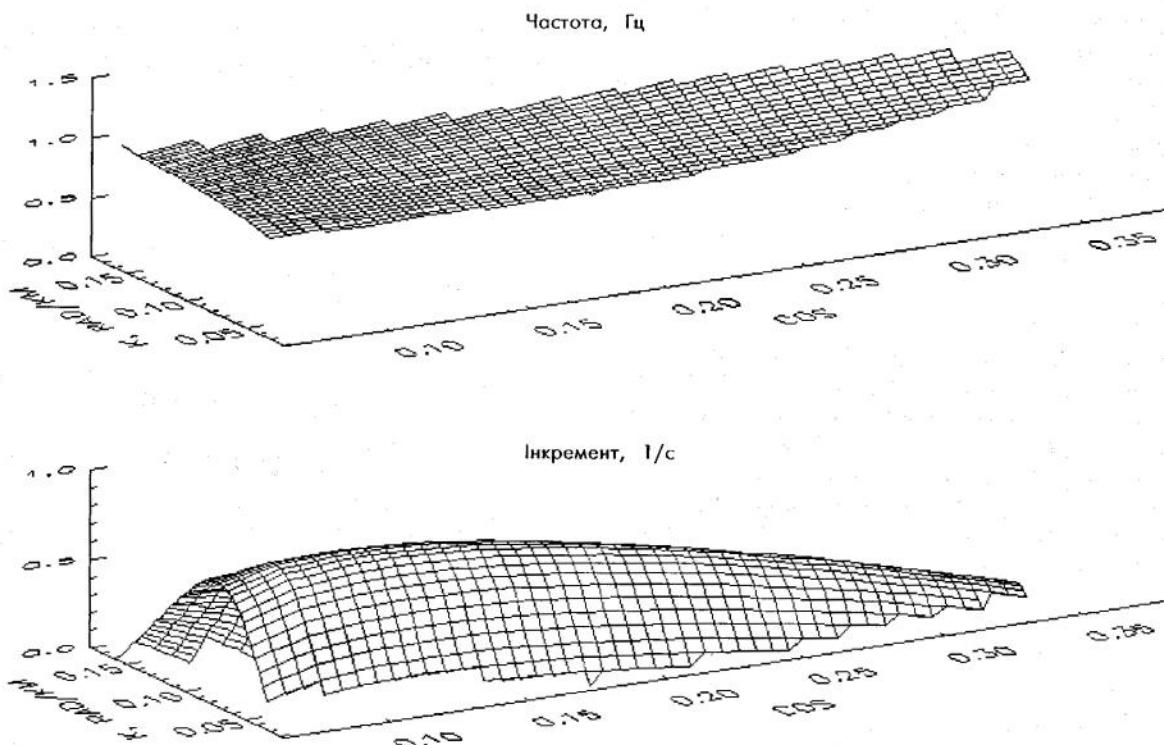


Рис. 4. Залежність частоти та інкремента іонно-циклотронних хвиль від хвильового вектора

ронів. Взагалі процес змішування плазми повинен відбуватися таким чином, щоб виконувалась умова

$$\sum_i e n_i \bar{V}_i \approx 0,$$

де n_i — густина i -го компонента плазми, \bar{V}_i — швидкість її спрямованого руху. Зрозуміло, що нейтралізація сумарного струму проходить за рахунок зміни швидкостей направленого руху електронів. Це неважко уявити з таких якісних міркувань — необхідні зміни швидкостей відбуваються під дією електричного поля, яке виникає внаслідок розділення зарядів. Маса електрона на три порядки менша від маси протона, тому він прискорюватиметься ефективніше. З цих же міркувань неважко бачити, що процес балансування струму призведе до збільшення направленої швидкості електронів перехідної області на величину порядку

$$V \approx V_{T_e} \frac{n_0}{n_1},$$

де V_{T_e} — теплова швидкість магнітосферних електронів, n_0 — концентрація частинок в магнітосфері, n_1 — концентрація частинок в перехідній області. Швидкість витікання магнітосферних електронів змениться на ту ж саму величину. Чисельні оцінки показують, що ця швидкість становить 3000—5000 км/с.

Проводилися розрахунки для наступних значень параметрів (взяті наблизеними до параметрів праці Paschmann et al., 1982):

1. Концентрація частинок в перехідній області — 20 см^{-3} , в магнітосфері — 1 см^{-3} , температура електронів та іонів в магнітосфері — 20 КeВ, електронів та іонів перехідної області — 50 еВ. Швидкості спрямованого руху для електронів магнітосфери — 50000 км/с, перехідної області — 4000 км/с, іонів магнітосфери — 900 км/с, перехідної області — 100 км/с. Для цього набору параметрів розвиваються нестійкості на частотах, близьких до ларморівської частоти іонів. Максимум інкремента досягається для хвильових чисел біля 0.1 рад/км та кутів між напрямком розповсюдження та магнітним полем з $\cos\theta \sim 0.1$. Приклад дисперсійних поверхонь для першої моди (з $\omega \sim \omega_H$) наведено на рис. 4. Залежність інкремента від кутів та хвильових чисел для перших чотирьох мод наведена на рис. 5 у вигляді контурного графіка. Видно, що для вищих гармонік максимум інкремента зсувається в бік менших кутів відхилення від перпендикулярного поширення та більших хвильових чисел.

2. Концентрація частинок в перехідній області — 20 см^{-3} , в магнітосфері — 1 см^{-3} , температура електронів та іонів в магнітосфері — 10 КeВ, електронів та іонів перехідної області — 100 еВ. Швидкості спрямованого руху для електронів магнітосфери — 40000 км/с, перехідної області — 4000 км/с, іонів магнітосфери — 900 км/с, перехідної області — 100 км/с. В цьому випадку спостерігаються нестійкості, подібні до описаних в п. 1. В цілому інкременти менші; залежність інкремента від кутів та хвильових чисел для перших трьох мод наведена на рис. 6 у вигляді контурного графіка.

3. Концентрація частинок в перехідній області — 20 см^{-3} , в магнітосфері — 1 см^{-3} , температура електронів та іонів в магнітосфері — 10 КeВ, електронів та іонів перехідної області — 400 еВ. Швидкості спрямованого руху для електронів магнітосфери — 40000 км/с, перехідної області — 4000 км/с, іонів магнітосфери — 900 км/с, перехідної області — 100 км/с. Для даного набору параметрів нестійкості не спостерігалися.

ОБГОВОРЕННЯ

Ця робота є першим кроком до чисельного дослідження механізмів генерації хвиль, що спостерігаються в подіях перенесення потоку. Перш за все слід зауважити, що розглядалися лише електростатичні хвилі, тобто магнітний компонент хвильової активності в хвильах не може бути пояснений. По-друге, зсунута максвелівська функція розподілу навряд чи є найкращим наближенням до функцій розподілу плазми поблизу магнітопаузи. Навіть навпаки, саме функції розподілу з анізотропними температурами можуть бути причиною багатьох нестійкостей. Послідовний аналіз функцій розподілу в ППП буде предметом подальших досліджень. Але навіть якісний розгляд запропонованого механізму виникнення двопотковості приходить до висновку, що повинні існувати джерела поповнення силової трубки магнітосферною плазмою. Дійсно, порядок часу витікання усіх електронів з магнітосферної частини відкритої силової трубки становить 10 с. Якісні міркування вказують на два механізми такого поповнення: з сусідніх магнітосферних областей або з іоносфери. Перший з них міг би пояснити більшу інтенсивність хвиль поблизу країв явищ. Розгляд другого механізму, навіть якісний, не може бути зроблений в рамках цієї роботи.

Нарешті, слід нагадати, що наведений аналіз є лінійним, і може лише виявити можливість розвит-

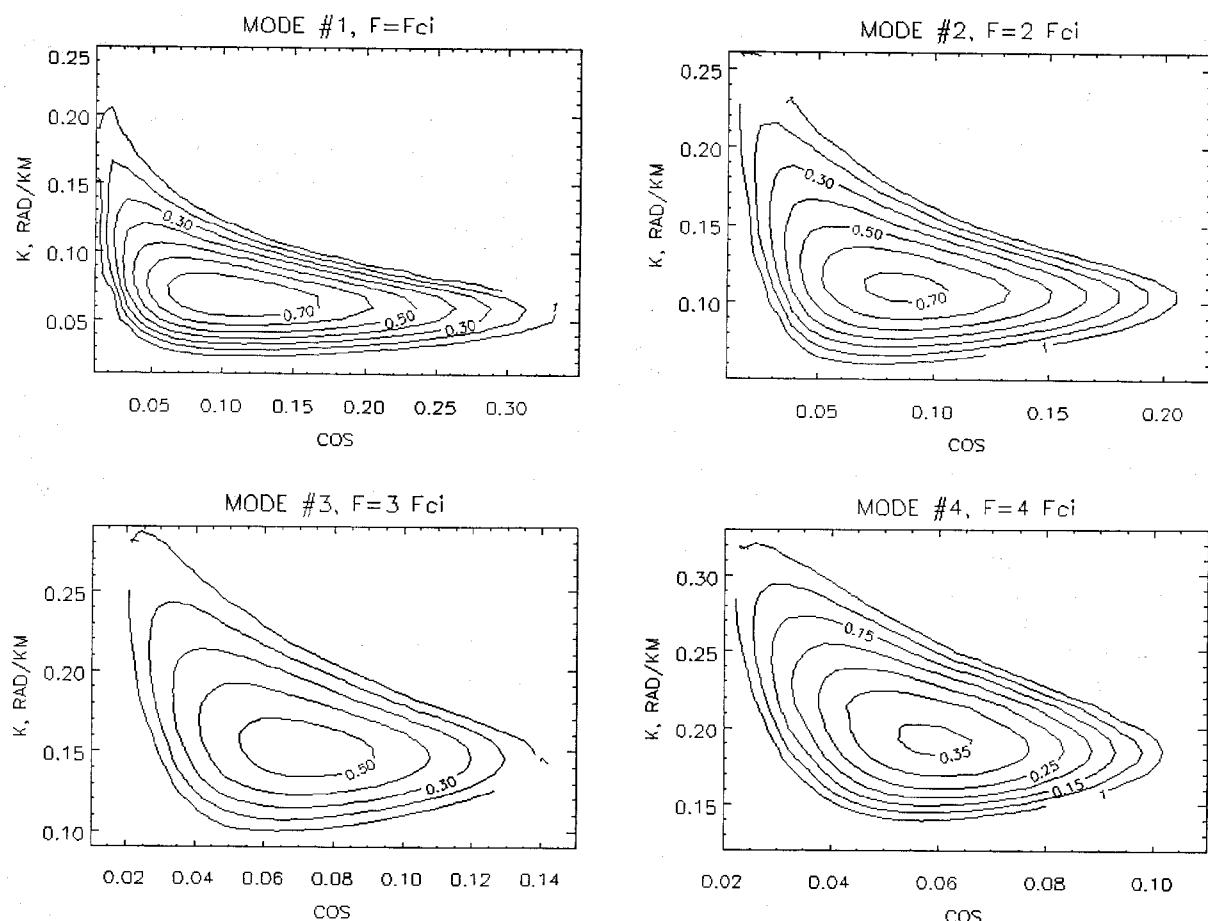


Рис. 5. Залежність інкремента нестійкості від хвильових чисел та кутів поширення. Набір параметрів 1 (див. текст)

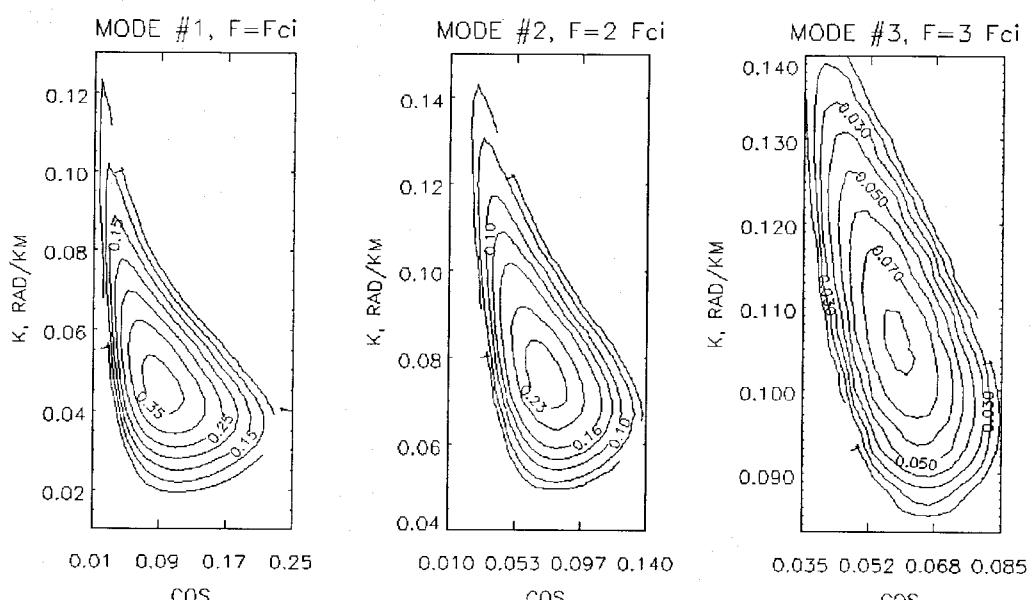


Рис. 6. Залежність інкремента нестійкості від хвильових чисел та кутів поширення. Набір параметрів 2

ку нестійкості. Нелінійна стадія розвитку та амплітуди насичення не можуть бути оцінені без відповідного знання механізму насичення даної нестійкості. Ці питання виходять за рамки цієї роботи.

ВИСНОВКИ

В роботі запропоновано механізм змішування плазми на відкритих силових лініях магнітного поля в подіях перенесення потоку. Внаслідок розвитку цього механізму може виникати нестійкість плазми перехідної області, електрони якої прискорюються для нейтралізації загального струму і виникає відносний рух їх відносно іонів. Нестійкість розвивається на частотах, близьких до гармонік ларморівської частоти іонів. Її інкремент більший для випадків з низькою температурою плазми перехідної області. В цілому запропонований механізм може пояснити наявність максимумів поблизу гармонік циклотронної частоти в спостережуваних спектрах хвиль в подіях перенесення потоку.

Цю роботу було виконано за підтримки гранта Комітету наукових досліджень Польської академії наук № KBN 2Z60000506 та контракту Національного космічного агентства України № 6-85/95.

Ситенко О. Г., Мальнєв В. М. Основи теорії плазми. — Київ: Наук. думка, 1994.

Anderson R. R., Harvey C. C., Hoppe M. M., et al. Plasma waves near the magnetopause // J. Geophys. Res.—1982.—87.—P. 2087.

Berchem J., Russell C. T. Flux transfer events on the magnetopause — spatial distribution and controlling factors // J. Geophys. Res.—1984.—80.—P. 6689.

Blecki J., Denis M., Kossacki K. (jr), Woolliscroft L. J. C. Plasma waves as a signature of flux transfer events // Proc. Int. Workshop on Space Physics Investigations by Cluster and

- Regata, Graz, Austria, 1990, ESA SP-306.
- Blecki J., Kossacki K., Klimov S. J., et al. ELF/ULF waves observed on Prognoz-8 near the magnetopause // Artificial Satellites Space Phys.—1987.—7, N 22.—P. 5.
- Kawano H., Kokubun S., Takashi K. Survey of transient magnetic field events in the dayside magnetosphere // J. Geophys. Res.—1992.—97.—P. 10677.
- LaBelle J., Treumann R. A., Haerendel G., et al. AMPTE IRM observations of waves associated with flux transfer events in the magnetosphere // J. Geophys. Res.—1987.—92.—P. 5827.
- Paschmann G., Haerendel G., Papamastorakis I., and Skopke N. Plasma and magnetic field characteristics of magnetic flux transfer events // J. Geophys. Res.—1982.—87.—P. 2159.
- Rijnbeek R. P., Cowley S. W. H., Southwood D. J. A survey of dayside flux transfer events observed by ISEE 1 and 2 magnetometers // J. Geophys. Res.—1984.—89.—P. 786.
- Russel C. T., Elphic R. C. ISEE observations of flux transfer events at the dayside magnetopause // Geophys. Res. Lett.—1979.—6, N 1.—P. 33.
- Schmitt J. P. M. Mathematical properties of plasma dispersion function // J. Plasma Phys.—1974.—12.—P. 51.

GENERATION OF ION-CYCLOTRON WAVES IN FLUX TRANSFER EVENTS

M. V. Ivchenko and J. Blecki

Flux Transfer Events at the dayside magnetopause are considered to be a result of transient and patchy reconnection taking place at the dayside magnetopause. A mechanism is proposed for generation of low-frequency electrostatic waves often observed in the events. In the open flux tube model of Flux Transfer Events magnetosheath and magnetospheric plasma populations mix on the open field lines. Using the zero net current condition, we show that the magnetosheath electrons are accelerated in order to compensate the current carried by hot magnetosphere electrons. A number of realistic sets of parameters for both plasma populations were used for numerical solution of the dispersion relation in the electrostatic approximation. Some of the solutions are presented. Questions related to the instability are discussed.