

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.05.083>

УДК 550.385

Б. Петренко^{1,2}

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
просп. Академіка Глушкова 4, м. Київ, Україна, 03127

²Інститут космічних досліджень Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України

Просп. Академіка Глушкова 40, к. 4/1, м. Київ-187, Україна, 03187
e-mail: bogdanart96@gmail.com

Мультимасштабність дисипативних процесів у хвості магнітосфери Землі

У геомагнітному хвості дисипація є тим процесом, який зупиняє каскадну передачу енергії в інерційному турбулентному діапазоні і трансформує енергію турбулентних рухів у нагрівання. У випадку кінетичної турбулентності з домінуванням газокінетичного тиску плазми над тиском магнітного поля дисипація можлива і в інерційному діапазоні. Розглядається підхід для отримання розподілу темпів конверсії енергії електромагнітного поля (мультимасштабний спектр) із попереднім залученням багатосупутникового методу обчислення щільності струму. Вперше отримано і проаналізовано мультимасштабний спектр конверсії енергії у хвості магнітосфери Землі. Було використано вимірювання магнітного та електричного полів з космічних апаратів місії MMS в області струмового шару та під час проходження високошвидкісних потоків плазми у плазмовому шарі 8 вересня 2021 р.

Ключові слова: конверсія енергії, електромагнітне поле, струмовий шар, хвіст магнітосфери Землі, MMS.

Вступ. У турбулентному середовищі геомагнітного хвоста дисипація є тим процесом, який зупиняє каскадну передачу енергії в інерційному турбулентному діапазоні і трансформує енергію турбулентних рухів (вихорів) у нагрівання. Окрім того, у випадку кінетичної турбулентності з $\beta \gg 1$ (з домінуванням газокінетичного тиску плазми над тиском магнітного поля) дисипація можлива і в інерційному турбулентному діапазоні [1]. Як реалізацію дисипації розглядають такі механізми: взаємодія хвиля — частинка (резонанс Ландау, циклотронний резонанс), нерезонансне розсіювання, стохастичне нагрівання та магнітне перезамикання [8].

Для оцінок трансформації електромагнітної енергії в кінетичну енергію заряджених частинок користуються скалярним добутком електричного поля і щільності струму $\mathbf{E} \cdot \mathbf{J}$, що по суті є «джоулівськими» втратами. Додатний

скалярний добуток $\mathbf{E} \cdot \mathbf{J} > 0$ означає трансформацію енергії поля в енергію заряджених частинок, і навпаки, при $\mathbf{E} \cdot \mathbf{J} < 0$ відбувається передача енергії заряджених частинок полю. У хвості магнітосфери Землі наявні області як з $\mathbf{E} \cdot \mathbf{J} > 0$ (генераторні області), так і з $\mathbf{E} \cdot \mathbf{J} < 0$ (області навантаження), але з домінуванням перших, насамперед це стосується областей диполаризаційних фронтів та високошвидкісних потоків плазми у хвості магнітосфери Землі [6]. Отримані раніше оцінки темпів трансформації енергій в цій області становлять $\mathbf{E} \cdot \mathbf{J} \sim 10^{-12}$ Вт/м³ [5]. У цій роботі вперше побудовано спектри конверсії енергії електромагнітного поля у хвості магнітосфери Землі, тобто фактично залежність $\mathbf{E} \cdot \mathbf{J}$ від просторово-часових масштабів. Для цього були використані дані місії MMS [2] при перетині струмового шару космічними апаратами 8 вересня 2021 р.

Метод. Опишемо методику кількісної оцінки трансформації електромагнітної енергії. Для отримання мультимасштабно-часових характеристик темпів перетворення енергії електромагнітного поля в енергію заряджених частинок і навпаки використано підхід, розроблений в роботі [7]. Маючи вейвлет-перетворення щільності струму $\hat{W}(\mathbf{J})$ та електричного поля $\hat{W}(\mathbf{E})$, можна отримати розподіл конверсії енергії $_{ECR}$ (в одиницях Вт м⁻³Гц⁻¹) по часу і масштабах:

$$_{ECR} \frac{1}{4} (\hat{W}(\mathbf{J}) \hat{W}^*(\mathbf{E}) - \hat{W}(\mathbf{E}) \hat{W}^*(\mathbf{J})).$$

Тут зірочкою позначено комплексно спряжені величини; добуток $\hat{W}(\mathbf{J}) \hat{W}^*(\mathbf{E}) = \hat{W}(J_x) \hat{W}^*(E_x) + \hat{W}(J_y) \hat{W}^*(E_y) + \hat{W}(J_z) \hat{W}^*(E_z)$.

Вектор щільності струму \mathbf{J} може бути визначений як на основі даних з давачів заряджених частинок (на основі плазмових моментів) або на основі одночасних вимірювань з чотирьох космічних апаратів вектора індукції магнітного поля \mathbf{B} з використанням методу курлометра, який базується на застосуванні рівняння Ампера [3]:

$$\mathbf{J} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{B}.$$

Струмом зміщення $\epsilon_0 \frac{\mathbf{E}}{t}$ в цьому методі нехтують, що є справедливим

для високопровідного середовища і низькочастотних коливних процесів. Фактично це реалізується за умови $\frac{\omega}{c} \ll 1$, де $\omega = \frac{B}{\mu_0} \frac{1}{r}$ — альвенівська швидкість. Для обчислення вектора щільності струму використовується вираз [3]

$$\mathbf{J} = \frac{1}{\mu_0} [\mathbf{r}_i \times \mathbf{B}_j - \mathbf{r}_j \times \mathbf{B}_i].$$

Тут \mathbf{r}_i та \mathbf{B}_i — різниці положення та магнітного поля відносно опорного космічного апарата ($i = 1$). Циклічною перестановкою ($i, j = 2, 3, 4$) отримується система трьох рівнянь з трьома невідомими J_x, J_y, J_z .

Результати. В роботі проаналізовано подію перетину струмового шару апаратами MMS за 8 вересня 2021 р. Космічні апарати перебували у хвості магнітосфери Землі у сутінковому секторі за координатами GSM $[-10.49, 11.19, -1.31]R_E$ (R_E — радіус Землі). Для кількісної та якісної оцінки дисипативних процесів було використано вимірювання ферозондових магнітометрів FGM [10] та електричних зондів EDP [4, 9]. Частоти опитування магнітометрів та електричних зондів різні, тому дані були приведені до од-

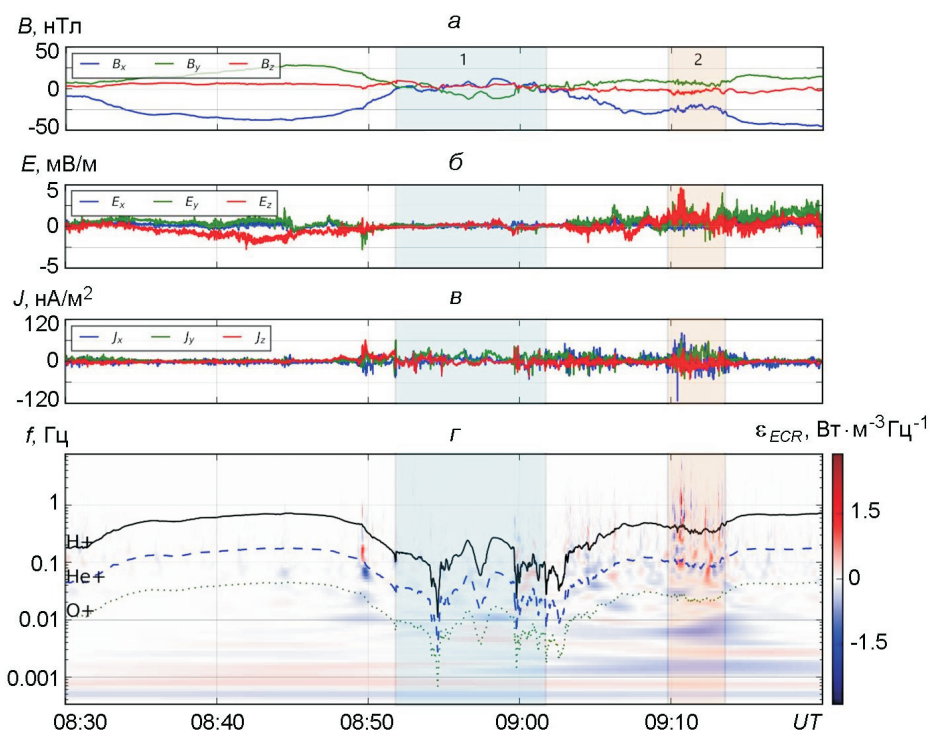


Рис. 1. Часові ряди векторів індукції магнітного поля (а), напруженості електричного поля (б), щільності струму (в) під час події 2021/09/08. Панель д — часово-масштабний розподіл темпу конверсії енергії з нанесеними гірчастотами іонів: червоні області вказують на дисипацію електромагнітного поля і нагрівання плазми, сині — на охолодження заряджених частинок

накової частоти дискретизації. Інтервал часу проходження струмового шару займав близько 10 хв, з 08:51:48 по 09:01:55 UT (рис. 1). Після проходження струмового шару (інтервал 1) спостерігається активність високошвидкісних потоків плазми, особливо це чітко видно в інтервалі часу 09:09—09:14 UT (інтервал 2). Той факт, що складова магнітного поля після проходження струмового шару залишається від'ємною, свідчить про динамічність струмового шару — те, що він наблизився до області розташування космічних апаратів, а потім віддалився (під складовою x розуміємо координату x у системі GSM, напрямом Земля — Сонце). Проходження струмового шару супроводжувалося декількома його перетинами (коливання B_x навколо нуля). Величини напруженості електричного поля для інтервалу 1 становлять кілька десятків долей мВ/м, а для інтервалу 2 — кілька одиниць мВ/м. Вимірювання інструмента EDP для апарата MMS2 не бралися до уваги, оскільки містять аномально високі синусоїдальні коливання E_z , що може бути помилкою на етапі попередньої обробки даних MMS. Цікаво, що у графіках на сайті MMS ці артефакти відсутні (у завантаженому файлі вони є).

Щільності струму, отримані багатосупутниковим методом курлометра, не перевищують 60 нА/м^2 для обох інтервалів 1 та 2. Концентрації іонів та електронів варіюють у межах $4 \dots 6 \text{ см}^{-3}$. Потоки електронів максимальні в енергетичному діапазоні $0.1 \dots 2 \text{ кеВ}$, потоки іонів — в $1 \dots 10 \text{ кеВ}$. Цікаво, що першу половину часу перетину струмового шару теплові електрони мають пітч-кутовий розподіл типу «сигара», тобто більшість з них мають домінан-

тну складову швидкості, паралельну до напрямку магнітного поля, а вже під кінець перетину розподіл стає більш ізотропним.

Розрахований часово-масштабний розподіл конверсії енергії електромагнітного поля за описаним вище методом демонструє наявність чергування областей генерації (дисипація поля, $\mathbf{E} \cdot \mathbf{J} > 0$) та областей навантаження ($\mathbf{E} \cdot \mathbf{J} < 0$, де заряджені частинки втрачають свою кінетичну енергію). При цьому в один момент часу можливе одночасне існування областей генерації та навантаження, як от перед початком проходження струмового шару приблизно в 08:49 UT. Найбільші темпи конверсії, як видно з рис. 1, більш притаманні інтервалу високошвидкісних потоків, що пояснюється більшими значеннями електричного поля та струму. Для першого інтервалу з 08:51:48 по 09:01:55 UT дисипація домінує на великих масштабах (частотах, менших від 0.01 Гц) та наприкінці інтервалу, де пітч-кутовий розподіл є більш ізотропним. Для другого інтервалу на великих масштабах домінує посилення енергії електромагнітного поля ($\mathbf{E} \cdot \mathbf{J} < 0$). Типові значення 10^{-12} Вт м⁻³Гц⁻¹ узгоджуються з результатами попередніх робіт [5, 6].

Роботу виконано за підтримки грантів Volkswagen Foundation (VW-Stiftung) No. 97742 та Royal Society International Exchanges Scheme 2021 (211177).

REFERENCES

1. Arzamasskiy L., Kunz M. W., Squire J., Quataert E., Schekochihin A. A. (2023). Kinetic turbulence in collisionless high- β plasmas. *Phys. Rev. X* 13(2), 021014.
2. Burch J. L., Moore T. E., Torbert R. B., Giles B. (2016). Magnetospheric multiscale overview and science objectives. *Space Sci. Rev.* 199, 5—21.
3. Dunlop M. W., Dong X. C., Wang T. Y., Eastwood J. P., Robert P., Haaland S., ..., De Keyser J. (2021). Curlometer technique and applications. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 126(11), e2021JA029538.
4. Ergun R. E., Tucker S., Westfall J., Goodrich K. A., Malaspina D. M., Summers D., ..., Cully C. M. (2016). The axial double probe and fields signal processing for the MMS mission. *Space Sci. Rev.* 199, 167—188.
5. Hamrin M., Marghitu O., Rönmark K., Klecker B., André M., Buchert S., ..., Vaivads A. (2006). Observations of concentrated generator regions in the nightside magnetosphere by Cluster/FAST conjunctions. *Ann. geophys.* 24(2), 637—649). Copernicus GmbH.
6. Hamrin M., Pitkänen T., Norqvist P., Karlsson T., Nilsson H., André M., ..., Dandouras I. (2014). Evidence for the braking of flow bursts as they propagate toward the Earth. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 119(11), 9004—9018.
7. He J., Duan D., Wang T., Zhu X., Li W., Verscharen D., ..., Burch J. (2019). Direct measurement of the dissipation rate spectrum around ion kinetic scales in space plasma turbulence. *Astrophys. J.* 880(2), 121.
8. He J., Zhu X., Verscharen D., Duan D., Zhao J., Wang T. (2020). Spectra of diffusion, dispersion, and dissipation for kinetic Alfvénic and compressive turbulence: Comparison between kinetic theory and measurements from MMS. *Astrophys. J.* 898(1), 43.
9. Lindqvist P. A., Olsson G., Torbert R. B., King B., Granoff M., Rau D., ..., Tucker S. (2016). The spin-plane double probe electric field instrument for MMS. *Space Sci. Revs.* 199, 137—165.
10. Russell C. T., Anderson B. J., Baumjohann W., Bromund K. R., Dearborn D., Fischer D., et al. (2016). The magnetospheric multiscale magnetometers. *Space Sci. Revs.* 199(1—4), 189—256.

B. Petrenko^{1,2}

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

²Space Research Institute National Academy of Sciences of Ukraine
and State Space Agency of Ukraine, Kyiv, Ukraine

MULTISCALE DISSIPATIVE PROCESSES IN THE EARTH'S MAGNETOTAIL

In the geomagnetic tail, dissipation is the process that stops the cascade transfer of energy in the inertial turbulent range and transforms the energy of turbulent motions into heating. In the case of kinetic turbulence with the dominance of the thermal pressure over the magnetic field pressure, dissipation is also possible in the inertial range. This paper considers an approach for obtaining the distribution of energy conversion rate (multi-scale spectrum) of the electromagnetic field with the preliminary involvement of the multi-spacecraft method of calculating the current density. For the first time, a multiscale spectrum of energy conversion rate in the tail of the Earth's magnetosphere was obtained and analyzed. Measurements of magnetic and electric fields from MMS mission spacecraft in the region of the current sheet and during high-speed plasma flows in the plasma sheet were used during 2021/09/08.

Keywords: energy conversion, electromagnetic field, current sheet, geomagnetic tail, MMS

Стаття надійшла до редакції 20.06.2023

Після доопрацювання 24.06.2023

Прийнята до друку 25.06.2023