

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2020.05.055>

УДК551.510; 533.93

**Б. А. Петренко<sup>1,2</sup>, Л. В. Козак<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
вул. Володимирська 64/13, Київ, Україна, 01601

<sup>2</sup>Інститут космічних досліджень Національної академії наук України  
та Державного космічного агентства України  
Просп. Академіка Глушкова, 40, к. 4/1, м. Київ-187, Україна, 03187  
[bogdanart96@gmail.com](mailto:bogdanart96@gmail.com)

## **Динаміка магнітних структур під час магнітосферної суббури**

*Магнітосфера Землі та навколишнє міжпланетне середовище можуть формувати сприятливі умови для реалізації нелінійного процесу вивільнення енергії у вигляді зміни топології магнітного поля та струмових систем, прискорення частинок, генерації хвиль та різких градієнтів параметрів, які є характерними ознаками явища суббури. На ранніх етапах дослідження вважалося, що зміна параметрів сонячного вітру є ключовим фактором, відповідальним за початок магнітосферної суббури, проте пізніше було показано, що цей фактор не є визначальним. Протягом декількох десятиліть відбувалося безперервне удосконалення інструментальної бази та методів і підходів до аналізу отриманих даних. Це допомогло виявити ланцюг процесів, які супроводжують явище суббури і провести їхній якісний і кількісний опис. Проте дотепер ще немає консенсусу в розумінні поетапного сценарію розвитку суббури. Метою проведених досліджень є визначення особливостей поширення та орієнтації транзєнтів (фронтів) у струмовому шарі хвоста магнітосфери Землі під час суббури. Для цього було проаналізовано виміри магнітного поля, отримані чотирма космічними апаратами місії Cluster II за 20 липня 2013 р. Під час магнітосферної суббури космічні апарати перебували на нічному боці магнітосфери Землі і реєстрували зміни геомагнітного поля. В ході досліджень було використано односупутниковий метод знаходження мінімальної варіації за вектором магнітного поля і багатосупутниковий таймінг-аналіз із залученням крос-кореляції часових рядів. Перший метод дозволяє знаходити напрямок нормалі до досліджуваної структури, а другий метод дає можливість віднайти напрям і абсо-*

лотне значення швидкості її поширення. Результати дослідження показують, що з розвитком суббурі для фронтів, рух яких відбувається в напрямку до Землі, спостерігається зниження швидкості поширення та значна кривина. Перший ефект (зменшення швидкості поширення фронтів) вказує на зменшення енергетичного запасу струмового шару для генерації таких транз'єнтів, а другий ефект (значний ступінь кривини) означає азимутальну локалізацію фронту.

**Ключові слова:** магнітосфера Землі, суббура, розриви у плазмі, аналіз мінімальної варіації.

## ВСТУП

Магнітосфера та іоносфера Землі формують комплексну систему струмів, яка взаємодіє з потоками сонячного вітру і має широкий діапазон просторово-часових масштабів процесів, що в ній відбуваються. Остання обставина слугує міцним підґрунтям для вивчення явищ, не відтворюваних у лабораторних умовах. Як відомо, вторгнення частинок сонячного вітру та вплив міжпланетного магнітного поля є ключовими факторами у формуванні геомагнітної активності. Резервуаром для збереження накопиченої енергії є плазмовий шар, розташований у геомагнітному хвості магнітосфери. Струмовий шар в цій області розділяє частини цього хвоста з протилежно напрямленими силовими лініями магнітного поля, які мають витягнуту в антисонячному напрямку конфігурацію. Звичайно, така система є перманентно змінною і нелінійною в еволюційному аспекті. Саме такі явища, як геомагнітні бурі та суббурі, проявляють себе у реконфігурації струмових систем магнітосфери. Останнє явище розвивається у декілька етапів: фази росту, фази розширення, фази відновлення.

Під час фази росту поперечний струм у струмовому шарі збільшується, і відповідно значення складової магнітного поля  $B_z$  зменшується. Саме тоді відбувається потоншення товщини струмового шару та поява вкраплених тонких струмових шарів [11]. Під час фази розширення за рахунок нестійкості відбувається розпад струмового шару, що проявляється у диполяризації — збільшенні  $B_z$  протягом десятків хвилин та виникненням турбулентних флуктуацій з певним степенеvim законом [3]. Все це супроводжується генерацією та поширенням транз'єнтів в напрямку до та від Землі. Проходження цих структур через фіксовану точку займає хвилини, а різкі градієнти магнітного поля з масштабами у секунди накладаються на тривалу диполяризацію [5]. Одним з таких транз'єнтів є імпульсні потоки з розігрітою та розрідженою плазмою, які відмежовуються від незбуреного середовища різким градієнтом  $B_z$ , який має назву диполяризаційного фронту (ДФ) [7, 9]. Дотепер ще залишаються відкритими питання, який внесок таких градієнтів у розвиток суббурі та який механізм є відповідальним за дисипацію структур у плазмовому середовищі без зіткнень

[11]. Моделювання особливостей таких структур під час ізольованої суббури підтвердило їхні спостережні властивості. Було встановлено, що перенесення магнітного потоку передусім відбувається через азимутально локалізовані імпульсні потоки [6]. В даній роботі ми визначаємо особливості поширення та орієнтації імпульсних потоків/транзієнтів за допомогою багатосупутникових вимірювань, що дозволило нам відтворити їхні спостережні еволюційні особливості в області дипольризації магнітного поля.

## ВИКОРИСТАНІ МЕТОДИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В даній роботі ми використовуємо геоцентричну сонячну магнітосферну систему координат GSM, яка є однією з найпридатніших систем координат при дослідженнях процесів взаємодії сонячного вітру та магнітосфери у магнітопаузі та хвостовій частині. Вісь  $x$  напрямлена від центра Землі до Сонця, вісь  $y$  — перпендикулярна до площини, утвореної віссю  $x$  та віссю магнітного диполя, і напрямлена у вечірній напрямок, вісь  $z$  доповнює систему до правої [4].

Для аналізу особливостей поширення розривів (фронтів) під час магнітосферної суббури було розглянуто виміри магнітного поля за 20 липня 2013 року. Космічні апарати (КА) фіксували глобальне збільшення  $B_z$ , встановлення більш дипольної конфігурації разом з різкими та високоамплітудними змінами цієї складової. На основі даних цієї події в роботі [8] продемонстровано ефективність прискорення частинок за різними профілями магнітного поля.

Були використані вимірювання ферозондових магнітометрів FGM місії Cluster II Європейського Космічного Агентства, частота опитування яких становить 22.4 Гц [1]. Чотири ідентичні КА місії перебували у хвостовій частині магнітосфери Землі на геоцентричній віддалі у  $(9.5...10.4)R_E$  у післяпівнічному секторі. Дистанції між космічними апаратами C1, C2, C3 не перевищували 10000 км. Відстань між космічними апаратами C3 та C4 не перевищувала 100 км. Всі КА, окрім C4, перебували у струмовому шарі під час фази розширення магнітосферної суббури (рис. 1 з нанесеними силовими лініями геомагнітного поля згідно з моделлю T89 з  $K_p$ -індексом 3 [14]), про що свідчить зміна знаку  $B_x$ -складової магнітного поля від від'ємного у південній до додатного у північній частині геомагнітного хвоста. Апарат C4 перетинає струмовий шар вже наприкінці фази розширення, тому настання суббури він реєструє згладженим чином, а амплітудні значення стрибків магнітного поля при фронтах є меншими у порівнянні з іншими КА, що узгоджується із передбаченнями моделювання [6].

Для знаходження поведінки еволюції та поширення магнітних структур, а саме дипольризаційних фронтів, було використано аналіз мінімальної варіації (AMB) та аналіз часової затримки.

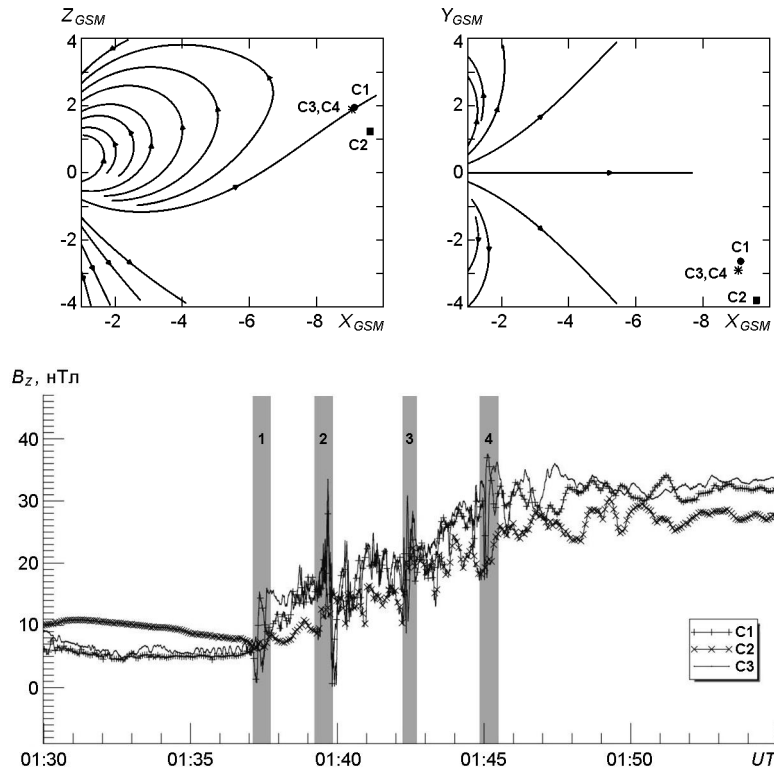


Рис. 1. Локалізація комічних апаратів Cluster II під час магнітосферної суббури 20 липня 2013 р. у системі GSM (вгорі) в одиницях радіусів Землі. Часові ряди складової магнітного поля  $B_z$  (внизу) з позначеними областями аналізу у плазмі (ДФ1, ДФ2, ДФ3, ДФ4). Значення поля для КА С4 через близькість до С3 не позначено

Аналіз мінімальної варіації історично став першим методом, що дозволяв побудувати систему координат на основі спостережень для дослідження того чи іншого процесу [10, 12]. Необхідність в цьому викликана вимогами зіставлення теоретичних/чисельних розрахунків з параметрами плазми та електромагнітними полями у системі, яка пов'язана зі структурою, наприклад, ударною хвилею, струмовим шаром або магнітним джгутом. Вхідними даними методу є часовий ряд векторного поля у точці. Результатом методу є новоутворена декартова система координат. При цьому припускається, що структура одновимірна і є незмінною в часі та просторі [13]. Метод теж корисно використовувати для структур більших розмірностей, але інтерпретація головних осей не є фізично визначеною. Оскільки магнітне поле є соленоїдальним ( $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ ), то є можливим для 1D-структури віднайти таку систему ортів  $x_1, x_2, x_3$ , в якій похідні векторного поля по  $x_1$  і  $x_2$  на границі стають рівними нулю внаслідок одновимірності задачі. А вимога соленоїдальності призводить до того, що автоматично  $\nabla \cdot \mathbf{B} / x_3 = 0$ , що означає незмінність поля вздовж цього напрямку. Практично знаходження цієї системи здійснюється мінімізацією дисперсії

$$^2 \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |B_n \langle B_n \rangle n|^2.$$

Мінімізація провадиться вибором нормалі  $\mathbf{n}$  до структури, що утворює орт  $x_3$  з часового ряду довжиною  $N$  для вектора  $\mathbf{B}$ , кутові дужки означають усереднення по всьому інтервалу. В роботі [13] показано, що ця задача еквівалентна задачі на знаходження власних чисел та векторів  $\mathbf{x}$  для матриці  $\mathbf{M}$ :

$$\mathbf{M}\mathbf{x} = \lambda \mathbf{x}, \quad (1)$$

де матриця  $\mathbf{M}$  формується через компоненти векторного поля:

$$M_{ij} = \langle B_i B_j \rangle - \langle B_i \rangle \langle B_j \rangle. \quad (2)$$

Кожному власному значенню у порядку зменшення відповідає власний вектор. Вектор відповідає найменшому власному значенню  $\lambda_3$ , і є нормаллю до структури. Власні вектори  $x_1, x_2$  є тангенціальними до площини структури (фронту). Власні значення мають квадратичну фізичну розмірність від фізичної розмірності вхідної величини і характеризують дисперсію поля вздовж вирахованих напрямків. Для кожного напрямку є можливим обчислення похибки [12]. Вважається, що нормаль є фізично обґрунтованою, коли  $\lambda_2 \gg \lambda_3$ . Слід зазначити, що даний метод не дозволяє визначити розмірність структури. Для визначення осі симетрії для силової трубки або магнітного джгута використовують вектор густини електричного струму як вхідний параметр. Часовий ряд векторного поля подають у системі координат власних векторів. Такі годограми дозволяють переконатися, що поле має мінімальну варіацію вздовж нормалі структури.

Для знаходження вектора швидкості поширення фронту необхідно використати таймінг їхнього проходження, який потребує щонайменше аналізу вимірювань чотирьох КА. Передусім необхідно визначити часові затримки між КА, які реєструють один фронт:  $t_1, t_2, t_3, t_4$ . В роботі використано крос-кореляцію для визначення цих затримок, особливо зважаючи на той факт, що затримки можуть становити лише десятки мілісекунд. Швидкість  $\mathbf{v}$  знаходиться через систему рівнянь  $\mathbf{m} = \mathbf{n}/v$  [2]:

$$\mathbf{D}\mathbf{m} = \mathbf{T}, \quad (3)$$

де матриця  $\mathbf{D}$  утворена з елементів різниці положень КА:

$$\mathbf{D} = (r_2 - r_1, r_3 - r_1, r_4 - r_1, r_3 - r_2, r_4 - r_2, r_4 - r_3),$$

а стовпчик  $\mathbf{T}$  складається з часових затримок:

$$\mathbf{T} = (t_{12}, t_{13}, t_{34})^T.$$

Для розглянутої події 20 липня 2013 р. магнітосферної суббури було обрано чотири проміжки, які містять транзйенти з різким градієнтом  $B_z$ , тобто диполяризаційні фронти (рис. 1). Ми сконструювали

**Таблиця 1.** Характеристики орієнтації та поширення розривів під час суббурі 20 липня 2013 р. Зірочкою позначено фронти, для яких метод спрацював вдало для максимальної варіації (напрямок у площині структури), а не для мінімальної варіації

КА	$T_0$ , UT	$\mathbf{n}$ , нТ <sup>2</sup> (АМВ)	$\mathbf{n}$ (АМВ)	$v$ , км/с	$\mathbf{v}/v$
ДФ1					
C1*	01:37:16	48.25, 0.44, 0.22	0.65, -0.51, -0.56		
C3	01:37:31	35.70, 1.09, 0.19	0.06, -0.84, -0.54		
C4	01:37:31	35.61, 1.24, 0.20	0.05, -0.84, -0.54		
ДФ2					
C1	01:39:38	27.12, 3.26, 0.59	0.53, 0.78, -0.34	470	[0.43, 0.85, -0.31]
C2*	01:39:36	4.11, 0.30, 0.17	0.44, 0.90, -0.04		
C3	01:39:38	38.29, 6.49, 0.69	0.97, -0.20, 0.13		
C4	01:39:38	39.00, 7.17, 0.72	0.95, -0.28, 0.15		
ДФ3					
C1	01:42:21	67.71, 4.67, 0.26	0.88, -0.46, 0.01	420	[0.64, -0.60, 0.48]
C2	01:42:16	17.42, 1.24, 0.12	0.93, -0.30, -0.21		
C3	01:42:25	35.74, 4.48, 0.62	0.95, 0.03, -0.30		
C4	01:42:25	39.25, 4.89, 0.50	0.95, 0.01, -0.32		
ДФ4					
C1	01:45:01	44.04, 1.73, 0.07	0.96, 0.03, -0.29	260	[0.32, 0.92, -0.21]
C2*	01:45:16	2.43, 0.15, 0.12	0.87, -0.47, 0.15		
C3	01:45:06	38.80, 1.07, 0.04	0.82, -0.52, -0.22		
C4	01:45:06	38.60, 1.02, 0.04	0.84, -0.49, -0.23		

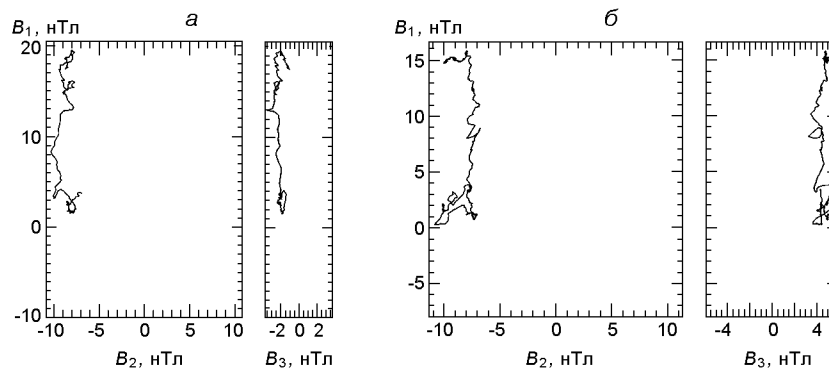


Рис. 2. Годограми для першого фронту ДФ1 за даними КА С1 (а), С3 (б)

систему варіацій для кожного обраного транзєнта, який проходив повз всі КА. Отримані значення нормалей та власних чисел, обраховані за формулами (1), (2) приведено у табл. 1. Інтервали, позначені зірочкою, добре характеризуються напрямком максимальної варіації, а не мінімальної. Всі фронти мають малі значення вертикальної складової нормалей, що означає, що вони перпендикулярні до струмового шару. ДФ2, ДФ3, ДФ4 мають нормалі, орієнтовані до Землі. Розрізненість значень нормалей для кожного КА свідчить про неплоскостність фронту. Похибки для нормалей становлять кілька градусів. На рис. 2 зображено годограми для ДФ1 КА С1, С3. Перший фронт ДФ1 не є виразним при проходженні через КА С2, оскільки він є віддале-

**Таблиця 2.** Часові затримки проходження фронтів між парами КА за результатами крос-кореляції

Фронти	$t_{12}$ , мс	$t_{13}$ , мс	$t_{34}$ , мс
ДФ1	—	14.93	-0.09
ДФ2	-2.53	0.71	0.13
ДФ3	-4.62	6.57	-0.13
ДФ4	14.84	5.2	0.22

ним від струмового шару, тому оцінки швидкості руху були здійснені для структур ДФ2, ДФ3, ДФ4. Щоб точно розрізнити відносність моментів проходження фронтів, ми скористалися крос-кореляцією часових рядів  $B_z$ -складової магнітного поля між парами КА (табл. 2). Швидкість та її напрямок отримані розв'язанням системи рівнянь за формулою (3). Помітно, що швидкості руху фронтів зменшуються під час протяжної дипольризації і становлять сотні кілометрів за секунду. Варіація магнітного поля вздовж нормалі  $B_3$  відносно мала.

## ВИСНОВКИ

Застосування багатосупутникових вимірювань під час типової магнітосферної суббури 20 липня 2013 р. у геомагнітному хвості дозволило визначити, що:

- 1) дипольризаційні фронти з різкими градієнтами  $B_z > 0$  характеризуються відмінністю нормалей в різних точках (складна границя);
- 2) спостерігається азимутальна локалізація фронту;
- 3) швидкість поширення фронтів знижується під час розвитку фази розширення суббури з 470 до 260 км/с, що свідчить про зменшення енергетичного запасу струмового шару для їхньої генерації.

## ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Робота виконувалась у відповідності з цільовою комплексною програмою НАН України з фізики плазми, в рамках спільних науково-дослідних проектів учених Київського національного університету імені Тараса Шевченка та НАНУ на 2019—2020 роки, при підтримці гранту 90312, 90312-1 та 97742 фонду Фольксваген (VW-Stiftung).

1. Balogh A., Carr C. M., Acuna M. H., Dunlop M. W., Beek T. J., Brown P., et al. (2001) The cluster magnetic field investigation: overview of in-flight performance and initial results. *Ann. Geophys.* 19(10/12). 1207—1217.
2. Harvey C. C. (1998) Spatial gradients and volumetric tensor. *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data*, Eds G. Paschmann, P. Daly. 307—322.
3. Kozak L. V., Petrenko B. A., Lui A. T. Y., et al. (2018) Turbulent processes in the Earth's magnetotail: spectral and statistical research. *Ann. Geophys.* 36. 1308—1318.

4. Laundal K. M., Richmond A. D. (2017) Magnetic coordinate systems. *Space Sci. Rev.* 206. 27—59.
5. Lui A. (2014) Evidence for two types of dipolarization in the Earth's magnetotail. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 115-116. 17—24.
6. Merkin V. G., Panov E. V., Sorathia K., Ukhorskiy A. Y. (2019) Contribution of bursty bulk flows to the global dipolarization of the magnetotail during an isolated substorm. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 124. 8647—8668.
7. Nakamura R., Baumjohann W., Klecker B., et al. (2002) Motion of the dipolarization front during a flow burst event observed by Cluster. *Geophys. Res. Lett.* 29. 20.
8. Parkhomenko E. I., Malova H. V., Popov V. Y., et al. (2018) Modeling of magnetic dipolarizations and turbulence in Earth's magnetotail as factors of plasma acceleration and transfer. *Cosmic Res.* 56. 453—461.
9. Runov A., Angelopoulos V., Zhou X.-Z., Zhang X.-J., Li S., Plaschke F., Bonnell J. (2011) A THEMIS multicase study of dipolarization fronts in the magnetotail plasma sheet. *J. Geophys. Res.* 116(A05216). 111—121.
10. Shi Q. Q., Tian A. M., Bai S. C., Hasegawa H., Degeling A. W., et al. (2019) Dimensionality, coordinate system and reference frame for analysis of in-situ space plasma and field data. *Space Sci. Rev.* 215. 35.
11. Sitnov M. (2019) Explosive Magnetotail Activity. *Space Sci. Rev.* 215(31). 111—121.
12. Sonnerup B. U. Ö., Cahill L. J. (1967) Magnetopause structure and attitude from explorer 12 observations. *J. Geophys. Res.* 72. 171.
13. Sonnerup B. U. Ö., Scheible M. (1998) Minimum and maximum variance analysis. *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data*, Eds G. Paschmann, P. Daly. 185—220.
14. Tsyganenko N. A. (1989) A Magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet. *Planet. Space Sci.* 37. 5—20.

Б. А. Петренко<sup>1,2</sup>, Л. В. Козак<sup>1,2</sup>

1Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко  
2Институт космических исследований НАН-ГКА Украины

#### ДИНАМИКА МАГНИТНЫХ СТРУКТУР ВО ВРЕМЯ МАГНИТОСФЕРНОЙ СУББУРИ

Магнитосфера Земли и ее окружающая межпланетная среда могут формировать благоприятные условия для реализации нелинейного процесса высвобождения энергии в виде изменения топологии магнитного поля и токовых систем, ускорение частиц, генерации волн и резких градиентов параметров, которые являются характерными признаками явления суббури. На ранних этапах исследования считалось, что изменение параметров солнечного ветра является ключевым фактором, ответственным за начало магнитосферной суббури, однако позже было показано, что этот фактор не является определяющим. В течение нескольких десятилетий, непрерывное совершенствование инструментальной базы и методов и подходов к анализу полученных данных помогало выявить цепь процессов, сопровождающих явление суббури и провести их качественное и количественное описание. Однако до сих пор еще отсутствует консенсус в понимании поэтапного сценария развития суббури. Целью проведенных исследований является определение особенностей распространения и ориентации транзиентов (фронтов) в токовом слое хвоста магнитосферы Земли во время суббури. Для этого проанализованы измерения магнитного поля полученные четырьмя космическими аппаратами миссии Cluster II за 20 июля 2013 года. Во время данного события космические аппараты находились на ночной стороне магнитосферы Земли и регистрировали изменения геомагнитного поля, при магнитосферной суббуре. В ходе исследований были использованы односпутниковый метод нахождения минимальной вариации вектора магнитного поля и мультиспутниковый



тайминг анализ с привлечением кросс-корреляции временных рядов. Первый метод позволяет находить направление нормали к исследуемой структуре, а второй метод дает возможность найти направление и абсолютное значение скорости ее распространения. Результаты исследования показывают, что с развитием суббури, для фронтов, движение которых происходит по направлению к Земле, наблюдается снижение скорости распространения и значительная степень кривизны. Первый эффект (уменьшение скорости распространения фронтов) указывает на уменьшение энергетического запаса токового слоя для генерации таких транзиентов, а второй эффект (значительная степень кривизны) обозначает азимутальную локализацию фронта.

**Ключевые слова:** магнитосфера Земли, суббури, разрывы в плазме, анализ минимальной вариации.

*B. A. Petrenko<sup>1,2</sup>, L. V. Kozak<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv

<sup>2</sup>Space Research Institute NAS-SSA Ukraine

#### DYNAMICS OF MAGNETIC STRUCTURES DURING THE MAGNETOSPHERIC SUBSTORM

The Earth's magnetosphere and the ambient interplanetary environment can create favorable conditions for the nonlinear process generation of energy release in the form of changes in the topology of the magnetic field and current systems, particle acceleration, wave generation and sharp parameter gradients, which are inherent to a substorm phenomenon. Initially, early studies substantiated the importance of changing the solar wind parameters as a key factor responsible for the beginning of a magnetospheric substorm, but later it was shown that this factor is not decisive. Over several decades, continuously improving methods for designing measurement tools and analyzing data helped to identify and conduct a qualitative and quantitative description of the processes that accompany this phenomenon. However, there is no consensus in understanding the scenario of substorm development stepwise. The purpose of the research is to determine the propagation and orientation features of transients (fronts) in the current layer of the Earth's magnetosphere tail during a substorm. To do this, the magnetic field measurements obtained by the four spacecraft of the Cluster II mission for July 20, 2013 are analyzed. During this event, spacecraft were located on the night side of the Earth's magnetosphere and recorded changes in the geomagnetic field during the magnetosphere substorm. We used the single-spacecraft method for finding the minimum variance of the magnetic field and multi-spacecraft timing analysis involving cross-correlation of time series. The first method allows finding the normal direction to the structure under study, and the second to find the direction and absolute value of its propagation velocity. The results of the study show that with the development of substorms, for fronts whose movement is moving towards the Earth, a decrease in the propagation velocity and a significant degree of curvature are observed. The first effect (a decrease in the propagation velocity of the fronts) indicates a decrease in the energy reserve of the current sheet for the generation of such transients, and the second effect (a significant degree of curvature) indicates the azimuthal localization of the front.

**Key words:** Earth magnetosphere, substorm, plasma discontinuities, minimum variance analysis.

Стаття надійшла до редакції 18.05.2020

Після доопрацювання 03.06.2020

Прийнята до друку 18.06.2020