

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.01.017>

УДК 550.385/387

**Сабін Гаутам<sup>1,3</sup>, Саруп Хадка Саурав<sup>2</sup>, Бінод Адхікарі<sup>2,4</sup>,  
Сантош Сапкота<sup>1</sup>, Парашу Рам Пудел<sup>1</sup>, Рошан Кумар Мішра<sup>4</sup>,  
Чхабі Кумар Шрестха<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Кампус Прітхві Нараян, Університет Трібхуван, Покхара, Непал

<sup>2</sup>Кампус Патана, Університет Трібхуван, Непал

<sup>3</sup>Астрономічне товариство Покхара (PAS), Непал

<sup>4</sup>Кафедра фізики, коледж Св. Ксав'єра, Непал  
sarupkhadkasaurav@gmail.com

## **Варіації $H$ -складової геомагнітного поля: зв'язок із кільцевими та напрямленими по полю струмами**

*Переважаючий вплив на геомагнітне поле мають збурення екваторіального кільцевого струму під час геомагнітної бурі. Короточасні нерегулярні зміни геомагнітного поля характеризуються взаємодією магнітного поля сонячного вітру та магнітосфери Землі, що створює змінний у часі струм у магнітосфері та іоносфері. У роботі досліджуються нерегулярні зміни  $H$ -компонента магнітного поля Землі під час трьох інтенсивних геомагнітних бур. Серед п'яти вибраних станцій чотири розташовані на низьких широтах, а одна — на середніх. Усі станції зафіксували максимальне зниження компонента  $H$  під час основної фази бурі, але подія раптового початку бурі перед початковою фазою спричинила незначне збільшення значень  $H$ . У кожній із подій низькоширотні станції зафіксували більші збурення магнітного поля, ніж середньоширотна станція. Цей результат підтверджує інтенсифікацію кільцевого струму, ініційовану передачею плазми та енергії через міжпланетні корональні викиди маси, що зрештою спричиняє зменшення  $H$ -компонента. Станція Какаду (південна широта) зафіксувала максимальне значення  $H$  у другій і третій події, цей результат підтверджує, що у південній півкулі реєструється велике зменшення компонента  $H$  під час бурі. Розраховані значення кільцевого струму та струму вздовж поля, показали крайню від'ємну кореляцію з  $H$ . Цей унікальний результат показує, що не лише кільцевий струм викликає збурення горизонтальної складової магнітного поля Землі; значний вплив спричиняє також і струм вздовж поля.*

© САБІН ГАУТАМ, САРУП ХАДКА САУРАВ, БІНОД АДХІКАРІ,  
САНТОШ САПКОТА, ПАРАШУ РАМ ПУДЕЛ, РОШАН КУМАР МІШРА,  
ЧХАБІ КУМАР ШРЕСТХА, 2023

**Ключові слова:** геомагнітні бурі, геомагнітне поле, кільцевий струм, струм вздовж поля.

## ВСТУП

Потік заряджених частинок, що походить від надзвичайно гарячої корони Сонця, спрямовується до Землі через викиди корональної маси (СМЕs) чи коротаційні області взаємодії (CIR). Після відкриття структури СМЕs [18, 28] було виявлено, що виникнення геомагнітних бур, тобто збурень у магнітосфері Землі, дуже пов'язані зі структурою СМЕs [7]. Якщо ці структури супроводжуються тривалою південною складовою ММП- $B_z$ , взаємодія з магнітним полем Землі, спрямованим на північ, посилює інжекцію заряджених частинок у магнітосферу через процес магнітного перез'єднання [13, 35]. Процес перез'єднання передає енергію сонячного вітру у магнітосферу та збільшує потік кільцевого струму; відповідно зменшується  $H$ -складова геомагнітного поля [19].

Геомагнітні коливання пояснюються колективною дією різних струмових систем у магнітосфері. У світі наявна велика кількість чутливих магнітометрів, здатних виявити від кількох до багатьох відсотків збурень геомагнітного поля, які просто відображають збурення в системах магнітосферних струмів у навколосемному просторі [12]. На відстанях  $(3...9)R_E$ , де  $R_E$  — радіус Землі, суттєвою є система струмів, яка циркулює на захід навколо Землі (кільцевий струм), і її збільшення призводить до глобальних зменшень напруженості магнітного поля, які називаються геомагнітними бурями [9, 40]. Позитивні іони, переважно породжені сонячним вітром та земною іоносферою [11], є найпомітнішою властивістю кільцевого струму. Ці заряджені частинки, що мають енергію порядку кількох тисяч кілоелектронвольт [25, 35], зазнають як градієнтних, так і криволінійних дрейфових рухів, які створюють західний кільцевий струм навколо Землі [41].

Крім того, є ще одна система струмів, що має стосунок до досліджень взаємодії магнітосфери та іоносфери [6], — струми, орієнтовані по полю ( $FAC$ ). У роботах [21, 23] струми  $FAC$  запропоновано розділити на струми регіону 1 (у напрямку до полюса) та регіону 2 (у напрямку до екватора). Унікальна особливість  $FAC$  полягає в тому, що він протікає по двох оболонках, які повністю оточують Землю: регіон 1 розміщується на найвіддаленішій частині магнітосфери, а регіон 2 — на області плазмового шару, розташованій ближче до Землі. У широкому діапазоні спокійних і збурених умов середня кількість  $FAC$ , що надходить в іоносферу, завжди дорівнює струму, що витікає з іоносфери.

Симетричний горизонтальний компонент зміни геомагнітного поля ( $SUM-H$ ) широко використовується для класифікації геомагнітних бур. Він вимірює стан кільцевого струму за допомогою наземних

магнітометрів, що відповідає відхиленню земного магнітного поля, викликаного індукованим протилежним магнітним полем від збільшеного кільцевого струму [32]. Струми в іоносфері мають магнітний вплив на Землю і моніторяться за допомогою магнітометрів на поверхні Землі [39]. Короткочасні нерегулярні коливання геомагнітного поля, викликані геомагнітною бурєю, називаються варіаціями збуреного дня ( $S_d(H)$ ), тоді як щоденні коливання геомагнітного поля при відсутності сонячних земних збурень відомі як варіації спокійного дня ( $S_q$ ) [26].

Основна фаза бурі має потужну складову  $B_z$  міжпланетного магнітного поля (ММП). Ситуація, коли компонент ММП- $B_z$  стає меншим за  $-10$  нТл (на південь), і це триває протягом щонайменше трьох годин, може розглядатися як основний критерій для підтвердження виникнення геомагнітної бурі та її посилення [14]. Дослідження геомагнітної бурі не тільки допомагають зрозуміти процес магнітного перез'єднання Сонце — Земля, але й забезпечують захист від небезпечних для життя відключень електроенергії, пошкоджень супутників, збоїв зв'язку та навігаційних проблем [15].

Ми вивчатимемо особливості, пов'язані з корональними викидами маси (СМЕs) та їхній вплив на геомагнітне поле. Щоб проаналізувати збурення геомагнітного поля під час трьох інтенсивних подій, пов'язаних із СМЕs, ми вибрали п'ять магнітометричних станцій: чотири розташовані в низьких широтах, а одна — у середніх широтах. Коливання наземного магнітного поля протягом спокійних і збурених днів будемо порівнювати з одночасними посиленнями кільцевого струму і *FAC*. Використовуючи техніку крос-кореляції, ми спробуємо дослідити зв'язок цих струмів із флуктуаціями геомагнітного поля.

## ВИКОРИСТАНІ ДАНІ

Ми зафіксували три події геомагнітної бурі: 20—21 листопада 2003 р., 7—9 листопада 2004 р. і 16—19 березня 2015 р. Для отримання рядів значень горизонтальної складової магнітного поля Землі у спокійні та збурені дні було використано дані Глобальної мережі магнітних обсерваторій INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network). Можна припустити, що  $H$ -компонент геомагнітного поля може змінюватися у просторі, тому для дослідження широтної залежності  $H$ -компонента ми взяли чотири низькоширотні та одну середньоширотну станції (див. табл. 1).

Ми вибрали основні міжпланетні параметри для розвитку цього дослідження. Найважливішим параметром є  $B_z$ , оскільки він пов'язаний з двома режимами взаємодії (південний  $B_z$  передбачає фронтальне магнітне перез'єднання, а північний  $B_z$  передбачає ламінарний режим потоку плазми, який може навіть розвинутися до турбулентності, що характеризується нестабільністю Кельвіна — Гельмгольца

Таблиця 1. Географічні та геомагнітні координати обраних станцій

Станція	IAGA	GLAT	GLON	MLAT	MLON
Алібаг	ABG	18.65° N	72.87° E	12.69° N	146.19° E
Мбур	MBO	14.70° N	16.57° W	19.45° N	58.13° E
Сан-Хуан	SJG	18.45° N	76.33° W	27.73° N	3.92° E
Ебро	EBR	43.03° N	4.40° W	45.60° N	77.06° W
Какаду	KDU	13.15° S	132.65° E	21.60° S	152.38° E

на межі). Інший параметр — тиск сонячного вітру ( $P_{sw}$ ), який передбачає стиснення магнітопаузи. Нарешті, будемо використовувати швидкість сонячного вітру ( $v_{sw}$ ) та щільність сонячної плазми ( $N_{sw}$ ), які є основними керівними параметрами процесу. Ми використовуємо низькоширотний геомагнітний індекс  $SYM-H$ , щоб оцінити важливість впливу кожного міжпланетного параметра на  $H$ -компонент. Параметри сонячного вітру та дані  $SYM-H$  були отримані із джерела OMNIweb <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>.

## МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ

Зміни значень  $H$ -компонента під час геомагнітної бурі ( $H_d$ ) відносно значень  $H$ -компонента у спокійні сонячні дні ( $H_q$ ) дорівнюють

$$H = H_q + H_d.$$

Для розрахунку потужності кільцевого струму ( $U_r$ ) протягом бурі використовується вираз [30]

$$U_r = 4 \cdot 10^4 \text{ abs} \frac{SYM-H}{60} \text{ abs} \frac{SYM-H}{4 \cdot 60 \cdot 60} \cdot 10^9, [\text{Вт}],$$

де  $SYM-H = \sum_{i=1}^n SYM-H(i)$ .

Струм  $FAC$  можна розрахувати, як запропоновано у роботі [22], де його інтенсивність визначається як

$$FAC = 0.328 [N_p^{1/2} v_{sw} B_T \sin(\theta/2)]^{1/2} \cdot 1.4,$$

де  $FAC$  виражено у мкА/м<sup>2</sup>, щільність сонячного вітру  $N_p$  — у см<sup>-3</sup>, швидкість сонячного вітру  $v_{sw}$  — у км/с, а  $B_T = (B_y^2 + B_x^2)^{1/2}$  — у нТл. Кут  $\theta$  вимірюється між позитивною віссю  $Z$  і вектором ММП у площині  $Y-Z$ . Він дорівнює  $\arctg(B_y / B_z)$  для  $B_z > 0$  і  $\theta = 180 - \arctg(B_y / B_z)$  для  $B_z < 0$ .

Після розрахунку  $H$ ,  $FAC$  і кільцевого струму ми застосували класичну статистичну техніку кроскореляції. Перехресний кореляційний аналіз із коефіцієнтами в діапазоні від  $-1$  до  $+1$  є процесом пошуку

зв'язку між двома часовими рядами [1, 2]. Це функція відносного часу між сигналами, тобто моменту часу, на який сигнал був зсунутий. Коефіцієнт кореляції між двома рядами  $X$  і  $Y$  дорівнює [29]:

$$r = \frac{(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{(X_i - \bar{X})^2 + (Y_i - \bar{Y})^2}}.$$

## РЕЗУЛЬТАТИ

У попередніх дослідженнях, наприклад [13, 34], обговорювався зв'язок варіацій геомагнітного поля та міжпланетних параметрів. Тут ми аналізуємо подібний випадок, досліджуючи варіації  $H$ -компонента та вплив на нього кільцевого струму і  $FAC$  для трьох вибраних подій.

Подія 1: 20 листопада 2003 р. На спадній фазі 23-го сонячного циклу стався потужний сонячний спалах і пов'язаний з ним геоєфективний CMEs, який рухався зі швидкістю 1100 км/с, що призвело до інтенсивних геомагнітних збурень протягом 20—21 листопада [3]. На рис. 1 ми можемо побачити поведінку параметрів міжпланетної плазми та  $SUM-H$  протягом 20—21 листопада 2003 року для найбільшої геомагнітної бурі 23-го сонячного циклу [16, 17]. Ця інтенсивна буря складався з однієї основної фази події, пов'язаної з високошвидкісними CMEs та сильним спалахом класу X у великій активній області на Сонці. За цією подією о 07:30 UT 20 листопада відбувся міжпланетний удар (IS), у результаті якого значення ММП- $B_z$  збільшилось з 8 до 30 нТл, а щільність і швидкість — з 8 до 20 см<sup>-3</sup> і з 440 до 710 км/с відповідно. Тиск потоку також збільшився з 3 до 23 нПа протягом періоду IS. Величина ММП- $B_z$  після поштовху сильно коливалася переважно у північному напрямку протягом короткого часу. Миттєве збільшення швидкості потоку, південного міжпланетного магнітного поля ( $B_z$ ) і тиску сонячного вітру означає виникнення CME.

Початкова фаза бурі почалася з того, що поле ММП- $B_z$  повернулось на південь о 12:00 UT з відповідним значенням  $SUM-H$  –90 нТл 20 листопада після початку SSC. Мінімальне значення  $SUM-H$  становило –490 нТл о 18:17 UT того ж дня. На рис. 1 ми можемо оцінити тривале (близько 12 год) від'ємне значення ММП- $B_z$  під час основної фази бурі. Подальше обертання компонента ММП- $B_z$  у північному напрямку ініціювало фазу відновлення бурі. Під час фази відновлення значення ММП- $B_z$  коливалися від –10 до 20 нТл, а ММП- $B$  мав мінімальні значення (< 10 нТл). Параметри сонячного вітру та ММП швидко зростали, вказуючи на початкову фазу, потім на коливання під час основної фази, і, нарешті, монотонно зменшувалися під час фази відновлення. Початкова, основна фаза та фаза відновлення цієї геомагнітної бурі тривали від 7:30 до 13:50 UT, від 13:50 до 18:20 UT та після 18:20 UT 20 листопада відповідно.

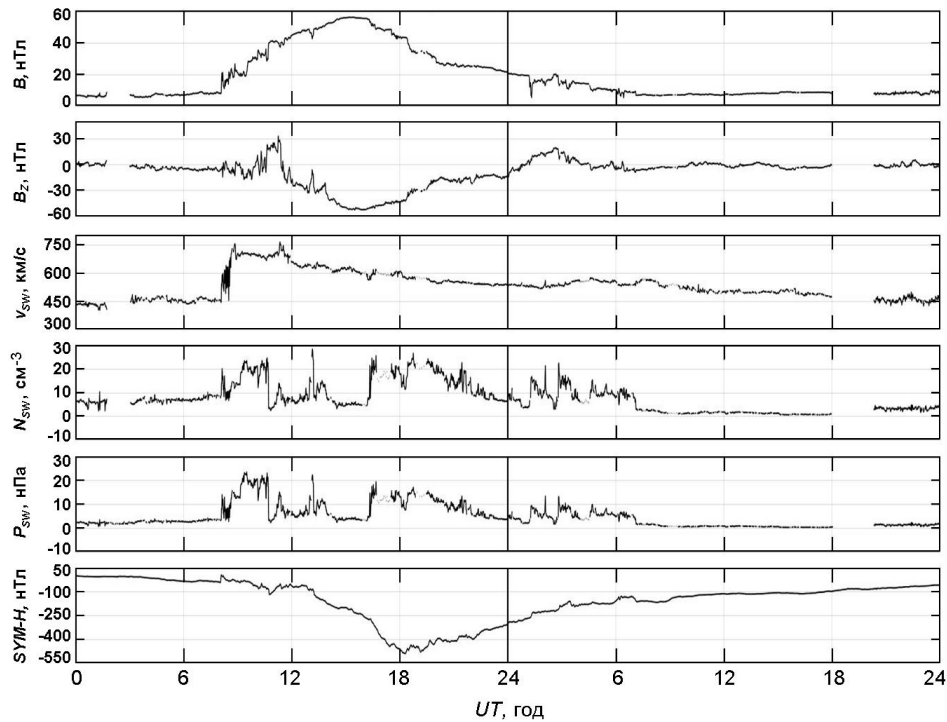


Рис. 1. Зміни загального міжпланетного магнітного поля ММП- $B$ , ММП- $B_z$ , швидкості сонячного вітру  $v_{sw}$  (км/с), щільності сонячного вітру  $N_{sw}$  ( $\text{см}^{-3}$ ), тиску сонячного вітру  $P_{sw}$  (нПа) та індексу  $SYM-H$  (нТл) за період 20—21 листопада 2003 р.

П'ять верхніх панелей на рис. 2 представляють спостережні значення  $H$ -компонента, отримані протягом неспокійного та спокійного дня 20—21 листопада 2003 р. на станціях ABG, EBR, KDU, MBO та SJG, а останні три панелі показують зміни кільцевого струму  $RC$ ,  $FAC$  та  $SYM-H$  відповідно. Чотири станції ABG, MBO, EBR і SJG лежать у північній півкулі, а станція KDU — у південній. Безперервні флуктуації кільцевого струму почалися з початкової фази, стали максимальними, а пізніше зменшилися одночасно з розподілом  $SYM-H$ , який є основним індикатором геомагнітної бурі. Природа кільцевого струму показала очевидні характеристики, які підтверджують той факт, що енергія кільцевого струму збільшується зі зменшенням  $SYM-H$ . Однак  $FAC$  трохи випередив мінімальний  $SYM-H$ . Характеристики  $FAC$  дещо відрізняються від характеристик кільцевого струму, його величина була максимальною на початковій та відновній фазі, а не в основній фазі, тоді як кільцевий струм постійно збільшувався протягом усіх фаз бурі. Крім того, максимальну варіацію між спокійним і збуреним днем було зафіксовано на станції MBO (631 нТл), а мінімальну (397 нТл) — на станції KDU під час основної фази.

Подія 2: 7 листопада 2004 р. На рис. 3 зображено розриви  $z$ -складової міжпланетного магнітного поля (ММП- $B_z$ ), параметрів сонячного вітру ( $v_{sw}$ ,  $N_{sw}$  і  $P_{sw}$ ) і геомагнітного індексу ( $SYM-H$ ) протягом

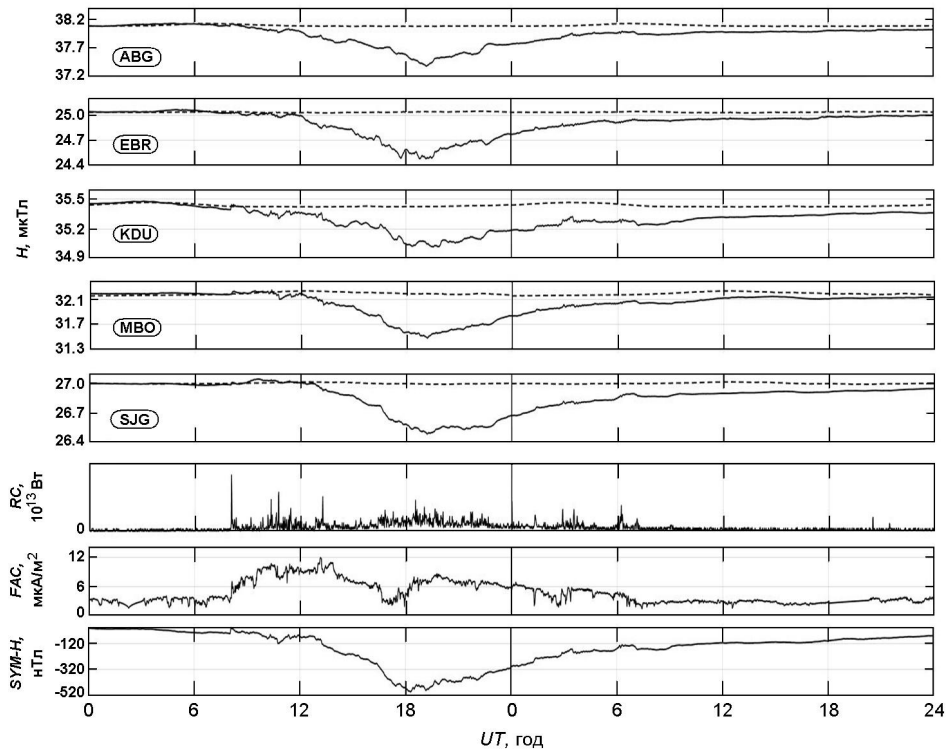


Рис. 2. Зміна компонента  $H$  (спостереження на станціях магнітометрів Алібаг, Ебро, Какаду, Мбур і Сан-Хуан), кільцевого струму  $RC$ , струму вздовж поля  $FAC$ , і  $SYM-H$  відповідно протягом 20—21 листопада 2003 р.

7—9 листопада 2004 р. Слідом за цією подією 9 листопада після фази відновлення наступила інша подія, але це дослідження зосереджено на першій бурі. Під час спадної фази сонячного циклу 23 активна область AR 1069 була джерелом великої кількості сонячних спалахів і СМЕ. Направлена на південь складова ММП- $B_z$  викликала дві послідовні геомагнітні бурі, за якими відбулися шість швидких ударів вперед і дві зворотні хвилі 7—11 листопада 2004 р. Хронографи білого світла SOHO/LASCO показують можливу область випромінювання СМЕ з активної області Сонця та області, що лежить поблизу центрального меридіана (N09E05) [38]. Ці збурення СМЕ у сонячно-земній космічній системі викликають нерегулярності в іоносфері, плазмосфері та магнітосфері.

Індекс  $SYM-H$  на нижній панелі (рис. 3) вказує на три події SSC, зареєстровані близько 03:00, 10:00 та 18:30 UT 7 листопада, і ці події були супроводжувались збільшенням швидкості сонячного вітру, тиску і магнітного поля. Після першої події SSC відбулося збільшення швидкості з 310 до 362 км/с, загального ММП- $B$  — з 4 до 9 нТл. При цьому показник  $SYM-H$  збільшився з 12 до 22 нТл. Друга подія SS о 10:00 UT 7 листопада підвищила ММП- $B$  з 4 до 18 нТл та індекс  $SYM-H$  з 30 до 67 нТл. Остання подія SSC призвела до сильного

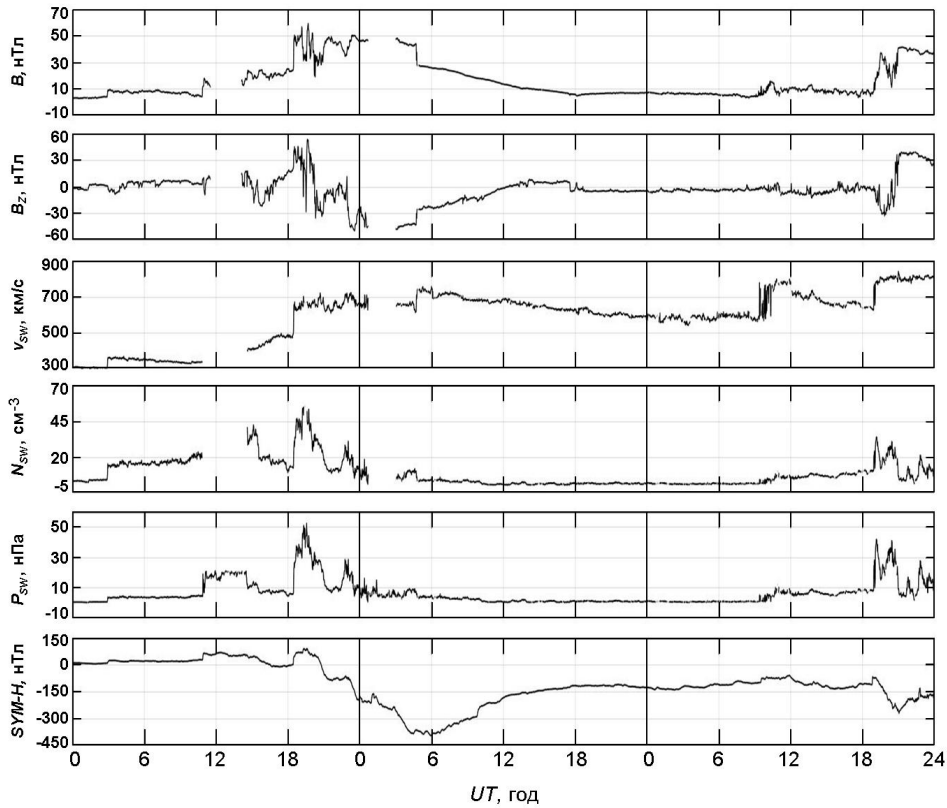


Рис. 3. Загальне міжпланетне магнітне поле ММП- $B$ , ММП- $B_z$ , швидкість сонячного вітру  $v_{sw}$  (км/с), щільність сонячного вітру  $N_{sw}$  ( $\text{см}^{-3}$ ), тиск сонячного вітру  $P_{sw}$  (нПа) та індекс симетричного кільцевого струму  $SYM-H$  (нТл) за період 7—9 листопада 2004 р.

стиснення магнітосфери о 18:30 UT. Швидке збільшення  $v_{sw}$  від 473 до 658 км/с, щільності  $N_{sw}$  від 13 до 30  $\text{см}^{-3}$  і тиску  $P_{sw}$  від 6 до 25 нПа підтверджують ознаки раптового початку бурі та вказують на початкову фазу геомагнітної бурі [10].

Спочатку цей вид поштовхів повернув ММП- $B_z$  на північ [31] зі стисненням магнітосфери, яке не дає можливості магнітного перез'єднання з полем оболонки, і, таким чином, призводить до лише мінімальних геомагнітних ефектів [35]. Після трьох подій SSC значення ММП- $B$  і ММП- $B_z$  досягли 50 нТл і  $-45$  нТл відповідно. Магнітна хмара, спричинена третім ударом і подальшим розвитком на південь ММП- $B_z$ , спричинила цю бурю на фазі після сонячного максимуму 23-го сонячного циклу.

Кільцевий струм, який створюється електричним полем разом з південним ММП, посилює різке зниження величини  $SYM-H$ . Процес відхилення ММП- $B_z$  на південь від північного напрямку генерує електричне поле, яке стає активним під час основної фази та створює умови екранування на вищих широтах [20, 24]. Після певного часу, протягом якого поле ММП- $B_z$  зберігало південний напрямок, воно



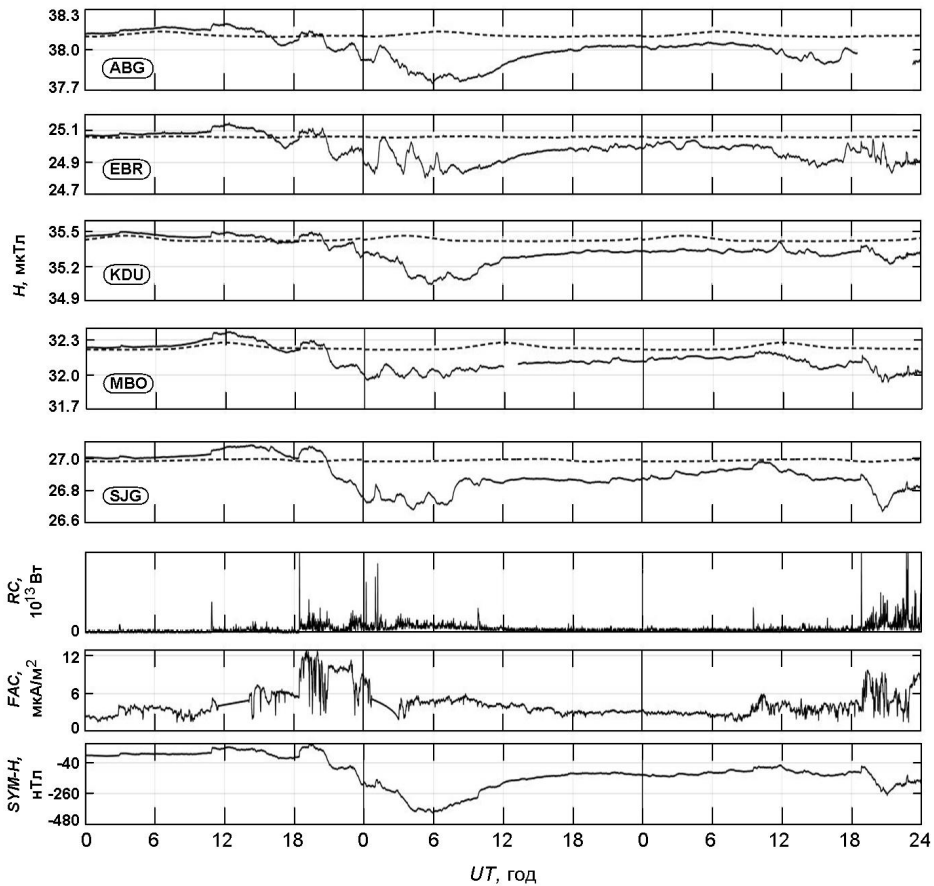


Рис. 4. Варіації компонента  $H$  (спостереження на магнітометричних станціях Алібаг, Ебро, Какаду, Мбур і Сан-Хуан), кільцевого струму, струму вздовж поля і  $SYM-H$  протягом 7—9 листопада 2004 р.

знову перемкнулось на північ, що призвело до надмірного екранування, яке є активним у фазі відновлення будь-якої бурі. Хоча складова  $B_z$  повернула на північ і розпочала фазу відновлення, друга буря [38] розвинулась до повного відновлення першої бурі.

Варіації горизонтальної складової магнітного поля Землі під час геомагнітної бурі 7—9 листопада 2004 р. разом із середніми варіаціями у спокійний день показано на рис. 4. Послідовність панелей така ж, як і в попередній події (рис. 2). Міжпланетні СМЕ були пов'язані з великими значеннями південного поля ММП- $B_z$ , які викликали зменшення компонента  $H$  через процес перез'єднання магнітосфера — іоносфера. На рис. 4 видно невелике збільшення компонента  $H$  геомагнітного поля, спричинене трьома подіями SSC о 03:00, 10:00 та 18:30 UT 7 листопада. Висхідний рух  $H$ -компонента був зумовлений збільшенням імпульсу струму магнітопаузи.

Раптове збільшення тиску сонячного вітру штовхнуло магнітопаузу у напрямку Землі з одночасним збільшенням струму магнітопаузи. Таким чином, цей струм ініціював раптове збільшення  $H$ -компонента

магнітного поля Землі [33]. Але під час основної фази  $H$ -компонент геомагнітного поля показав сильну депресію, і  $SYM-H$  знизився до мінімуму. Найбільшу зміну компонента  $H$  відносно спокійного дня було зафіксовано на станції KDU, яка досягла 400 нТл під час основної фази бурі. Подібним чином станції AVG, EBR, MBO та SJG зафіксували максимальну варіацію 370, 255, 260 та 294 нТл відповідно.

Подія 3: 16—19 березня 2015 р. Варіації параметрів сонячного вітру ( $v_{sw}$ ,  $N_{sw}$  і  $P_{sw}$ ), міжпланетного магнітного поля (ММП- $B_z$  і ММП- $B$ ) і геомагнітного індексу ( $SYM-H$ ) під час геомагнітної бурі 16—19 березня 2015 р. показано на рис. 5. Буря супроводжувалась трьома міжпланетними поштовхами (IS) і була пов'язана з СМЕ, що виник із активної області Сонця 2371 [4, 5, 37]. У 2015 р. на видимій стороні Сонця було кілька активних областей. Гало СМЕ, спрямоване на Землю, досягло Землі увечері 16 березня, спричинивши раптову бурю. Принаймні два інших СМЕ вдарили по Землі пізніше, 17 березня, один стався о 05:30 UT, а інший, більш потужний, спричинив посилення бурі ( $D_{st}$ ) о 18:36 UT. Ці три СМЕ, що дісталися Землі, характеризуються як три міжпланетні поштовхи.

На рис. 5 видно, що всі три події IS виникли разом із різкими змінами швидкості сонячного вітру, щільності та амплітуди міжпланетного магнітного поля (ММП- $B$ ) і південних компонентів  $B_z$ . Крім того, видно, що третя подія IS була особливо сильною. Більшість досліджень зосереджено на південному міжпланетному магнітному полі ( $B_z$ ), оскільки воно має прямий зв'язок з областю кільцевих струмів і контролює швидкість зв'язку енергії сонячного вітру з магнітосферою Землі та призводить до зміни геомагнітного поля. Раптову зміну індексу  $SYM-H$  (рис. 5) було зафіксовано у першій події IS о 16:50 UT 16 березня, яка характеризувалася збільшенням швидкості сонячного вітру до 322 км/с, щільність сонячного вітру різко змінилася з 16 до 40 см<sup>-3</sup>, тиск потоку збільшився до 9.47 нПа. Натомість під час першого IS не було жодних змін у ММП- $B_z$  та ММП- $B$ . Подібні зміни можна спостерігати під час другого IS о 05:50 UT 17 березня, але було цікаво спостерігати нахил ММП- $B_z$  на південь до 9.77 нТл. Нарешті, третя подія відбулася з гігантським СМЕ о 18:37 UT 17 березня.

Неухильне зменшення південного компонента ММП- $B_z$  (-39.98 нТл) точно підтримується швидким нахилом індексу  $SYM-H$  (208 нТл), що є другою за величиною бурею в 24-му сонячному циклі [4]. Це безперервне зменшення компонента ММП- $B_z$  є необхідним аспектом виникнення геомагнітної бурі, і для події, пов'язаної з СМЕ, це повинно характеризуватися стійким напрямком на південь або низькочастотними коливаннями. Безперервний потік напруженості магнітного поля (ММП- $B$ ) під час бурі був спричинений викидом корональної маси.

На рис. 6 п'ять верхніх панелей показують зміну компонента  $H$  протягом збурених і спокійних днів, які спостерігалися на станціях Алібаг, Ебро, Какаду, Мбур і Сан-Хуан у березні 2015 р. Штрихові

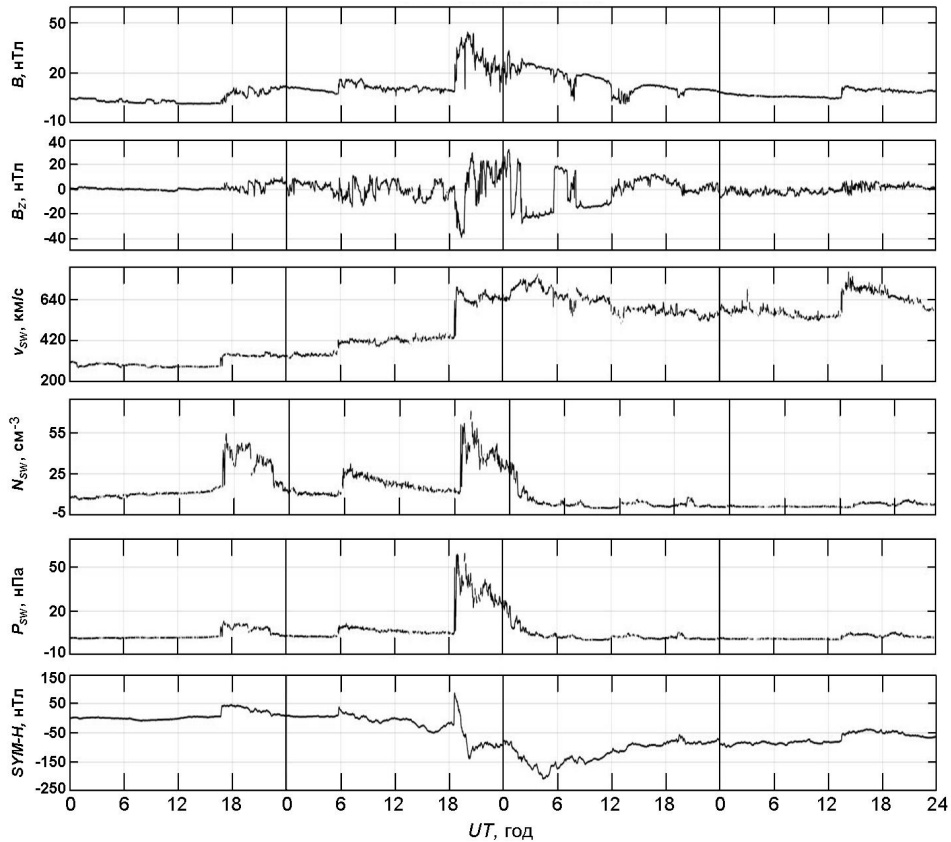


Рис. 5. Варіації загального міжпланетного магнітного поля ММП- $B_y$ , ММП- $B_z$ , швидкості сонячного вітру  $v_{sw}$  (км/с), щільності сонячного вітру  $N_{sw}$  ( $\text{см}^{-3}$ ), тиску сонячного вітру  $P_{sw}$  (нПа) та індексу симетричного кільцевого струму  $SYM-H$  (нТл) за період 16—19 березня 2015 р.

криві представляють варіації  $H$  для спокійних днів, а суцільні криві — варіації  $H$  для збурених днів. Останні три панелі представляють зміну потужності кільцевого струму, струму вздовж поля, і значення  $SYM-H$  протягом 16—19 березня 2015 р. Видно, що на кожній панелі перші три раптові імпульси збільшили величину  $H$ -компонента. Але під час основної фази  $H$ -компонент різко зменшився до мінімуму на кожній станції через посилення кільцевого струму в екваторіальній площині Землі. У цьому випадку максимальне відхилення на 242.73 нТл зафіксовано на станції Какаду (KDU).

*Взаємна кореляція кільцевого струму та струму вздовж поля з варіаціями  $H$ .* На рис. 7 приведено діаграму взаємної кореляції між енергією кільцевого струму та струму вздовж поля зі значеннями  $H$  за даними геомагнітних станцій ABG, EBR, KDU, MBO та SJG для події 20—21 листопада 2003 р. Як видно, потужність кільцевого струму та струм вздовж поля на кожній станції сильно антикорельовані з  $H$  як реакція пониження горизонтальної складової магнітного поля Землі на посилення кільцевого струму та системи  $FAC$ .

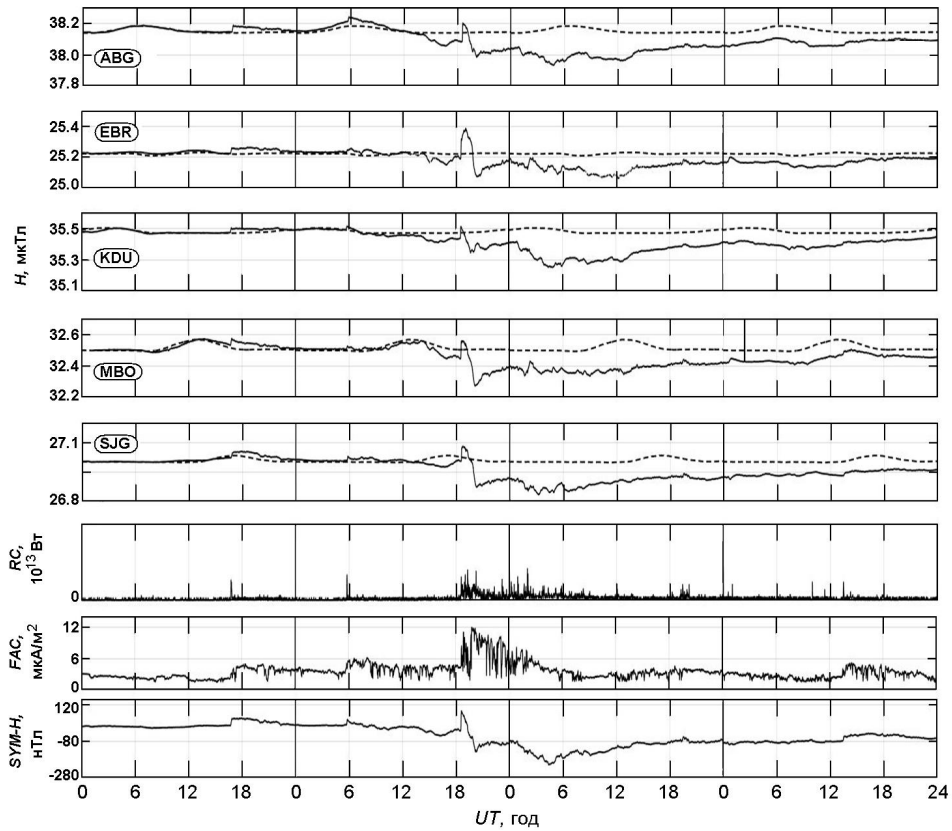


Рис. 6. Варіації компонента  $H$  (спостереження на магнітометричних станціях Алібаг, Ебро, Какаду, Мбур і Сан-Хуан), кільцевого струму, струму вздовж поля і  $SYM-H$  протягом 16—19 березня 2015 р.

Для Події 1 максимальне значення негативної кореляції потужності кільцевого струму та  $H$  (рис. 7а) зафіксоване на станції Какаду із затримкою часу 6 хв ( $-0.76$ ), тоді як мінімальне ( $-0.70$ ) — на станції Сан-Хуан теж із затримкою часу 6 хв. Часова затримка для кожної станції означає, що кільцевий струм спочатку посилюється під час бурі, що пізніше детектується кожною геомагнітною обсерваторією як зменшення значення  $H$ -компонента Землі. Коефіцієнт крос-кореляції між потужністю струму вздовж поля і  $H$  (рис. 7б) мав максимальне значення  $-0.81$  із часовим лагом 320 хв на станціях KDU та ABG. Натомість станція SJG зафіксувала мінімальний негативний коефіцієнт кореляції  $-0.80$  із затримкою в 0 хв. Графік несиметричний з більшим нахилом у негативний бік шкали часу. Ці великі часові затримки свідчать про те, що величина  $FAC$  збільшується перед основною фазою геомагнітної бурі.

На рис. 8 приведено значення коефіцієнта  $r$  крос-кореляції  $H$  із кільцевим струмом (а) і струмом вздовж поля (б) для події 2. Видно (рис. 8а), що для події 2 потужність кільцевого струму мала найвищий коефіцієнт крос-кореляції  $-0.90$  за даними станції KDU з часовим лагом 0 хв і найменший негативний коефіцієнт кореляції  $-0.87$  — на

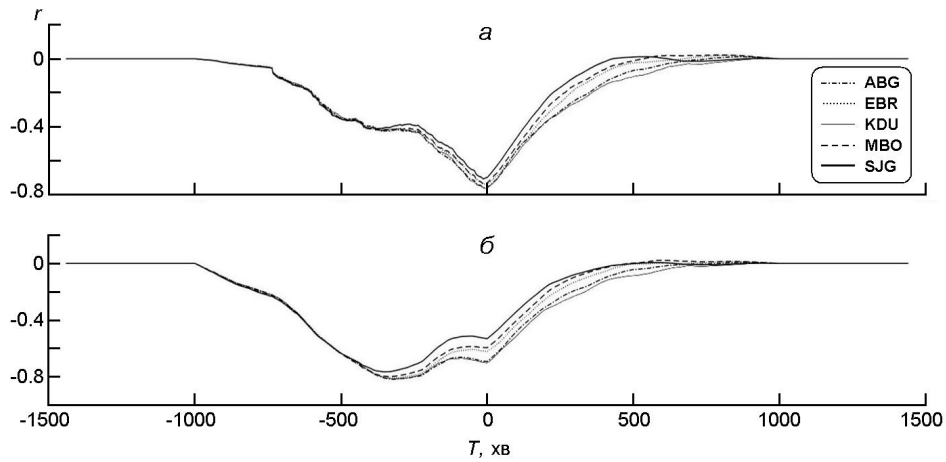


Рис. 7. Взаємна кореляція збурення  $H$  станцій Алібаг, Ебро, Какаду, Мбур і Сан-Хуан з енергією кільцевого струму (а) та струму вздовж поля (б), на головній фазі бурі 20 листопада 2003 р. (подія 1)

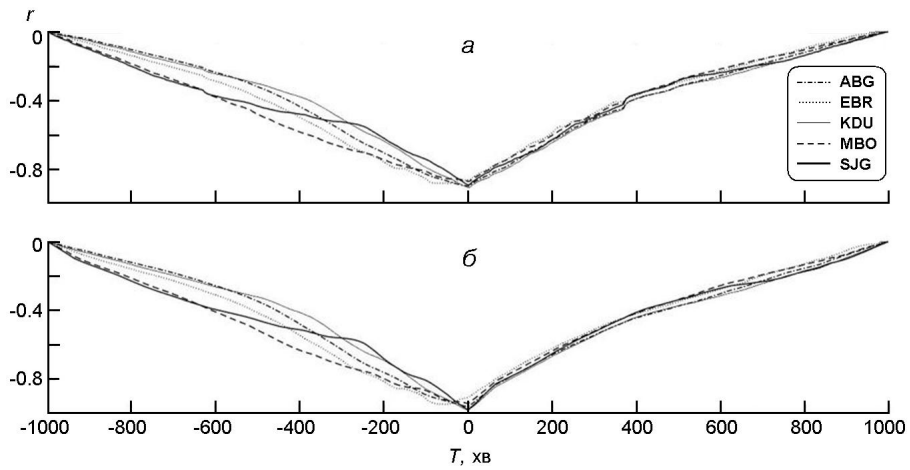


Рис. 8. Те ж для події 2 (8 листопада 2004 р.)

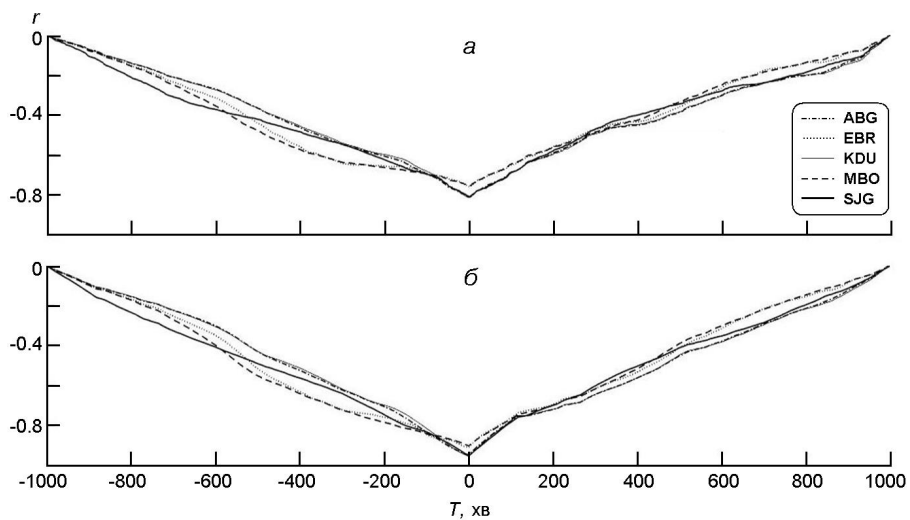


Рис. 9. Те ж для події 3 (16 березня 2015 р.)

станції МВО з часовим лагом 0 хв. У випадку *FAC* (рис. 8б) станція KDU показала максимальний негативний коефіцієнт кореляції  $-0.97$  із часом затримки 0 хв, тоді як МВО — найменший коефіцієнт кореляції  $-0.94$  із часом затримки 0 хв.

Значення коефіцієнта крос-кореляції для події 3 (16 березня 2015 р.) приведено на рис. 9. Тут енергія кільцевого струму та  $H$  мають максимальний негативний коефіцієнт крос-кореляції  $-0.81$  за даними станції KDU з 0-хв часом затримки, а мінімальне його значення  $-0.75$  отримано на станції МВО з часовим лагом 0 хв. Для *FAC* і  $H$  найвища кореляція  $-0.95$  спостерігається на станції KDU з часом затримки 0 хв, а найнижча ( $-0.90$ ) — для станції МВО з часовим запізненням 0 хв.

## ОБГОВОРЕННЯ

Після дослідження трьох інтенсивних геомагнітних бур виявилось, що  $H$ -компонент геомагнітного поля зменшується асиметрично під час геомагнітних бур. Кільцева течія в основному призводить до появи збурень поля, спрямованого на південь. Очевидно, сильним є вплив екваторіального часткового кільцевого струму (*PRC*) на  $H$ -компонент. Позитивні іони, що утворюються сонячним вітром, захоплюються геомагнітним полем. Під час геомагнітних бур такі іони зазнають азимутального дрейфу і згодом становлять основну частину кільцевих носіїв струму. Фаза максимуму бурі часто супроводжується великою кількістю іонів  $O^+$ . Іони несуть електричний струм на захід, який помітно зменшує  $H$ -компонент геомагнітного поля [9].

Перенесення частинок плазми від сонячного вітру, пов'язаного з СМЕ, у кільцевий струм викликає магнітну бурю. У той час, коли велика кількість частинок інжектується з хвоста магнітосфери у кільцевий струм, головним чином посиленням електричним полем сонячного вітру в сутінках, повна енергія кільцевого струму збільшується, і спостерігається відповідне послаблення поверхневого магнітного поля. Значне зменшення збуреного денного  $H$ -компонента на кожній станції з наступним мінімумом значень *SYM-H* відповідає основній фазі бурі. До та після основної фази бурі криві спокійного та збуреного дня демонструють майже однаковий характер на всіх станціях.

Геомагнітна буря та пов'язаний із нею південний напрямок  $MMF-B_z$  є необхідною умовою для зменшення поля  $H$  на екваторіальних станціях. Значення *SYM-H* стають негативними на кожній станції одночасно, коли компонент  $H$  починає зменшуватися, тоді як величина кільцевого струму наближається до максимуму. Ці непаралельні зв'язки свідчать про те, що спад  $H$ -компонента здебільшого відбувається шляхом посилення енергії кільцевого струму через геомагнітну бурю. Величина *FAC*, з іншого боку, зменшується до мінімуму, коли починається основна фаза бурі, а пізніше вона збільшується під час фази відновлення.

**Таблиця 2.** Максимальне значення  $H$  для обраних станцій під час основної фази відповідних подій

Станція	$H$ , нТл		
	Подія 1	Подія 2	Подія 3
Алібаг	699	371	239
Мбур	712	261	231
Сан-Хуан	569	295	167
Ебро	557	256	164
Какаду	413	400	246

Максимальні значення  $H$  під час основної фази бур, для яких  $H$ -компонент максимально зменшується, приведено у табл. 2. Варіації  $H$ -компонента різні для кожної станції під час кожної події. Якщо ми розглядаємо наявність кільцевого струму в екваторіальному регіоні, варіація повинна бути більшою в регіоні низьких широт. Але з даних таблиці ми можемо сказати, що варіація є випадковою, немає ніякої конкретної закономірності у змінах  $H$ .

Точно встановлено, що кільцевий струм тече у магнітній екваторіальній площині. У певний період геомагнітної бурі топологія кільцевих струмів перерозподіляється, тобто відхиляється від екваторіальної площини [8], що можна зафіксувати на різних геомагнітних обсерваторіях. У першій події максимальне значення  $H$  спостерігалося на станції Мбур (геомагнітна широта 19.45 пн. ш.), але у другій і третій події максимальне відхилення  $H$ -компонента відбулося на станції Какаду (геомагнітна широта 21.60 пд. ш.). Відхилення  $H$ -компонента повинно бути максимальним на станції Алібаг, якщо ми розглядаємо положення кільцевого струму в екваторіальній площині, але наші спостереження показують максимум на станції Мбур і Какаду, що може бути невеликим відхиленням кільцевого струму під час бурі [8].

Друга та третя події показують значне зменшення компонента  $H$  на станціях низьких широт (ALI, MBO, KDU та SJG) порівняно зі станцією Ебро на вищій широті, що відбувається через домінуючу систему кільцевих струмів у екваторіальній площині. Винятковий випадок першої події може виникнути через асиметрію кільцевого струму або перерозподіл кільцевого струму під час грози.

Кроскореляційний аналіз показує значну антикореляцію варіацій  $H$ -компонента з потужністю кільцевого струму та струму вздовж поля. Станція KDU продемонструвала максимальну антикореляцію з енергією кільцевого струму та FAC при кожній події, тоді як MBO мала мінімальну антикореляцію, за винятком першої події. Ця надзвичайна негативна кореляція, що чітко вказує на посилення кільцевого струму та струму вздовж поля, має зворотний вплив на гори-

зонтальну складову магнітного поля Землі за даними спостережень з різних станцій INTERMAGNET. Негативна кореляція  $H$  з енергією кільцевого струму та  $FAC$  свідчить про те, що система магнітосферних струмів має значний вплив на збурення магнітного поля Землі під час геомагнітної бурі.

## ВИСНОВКИ

Міжпланетна структура корональних викидів маси (СМЕ) розглядається як вагомий кандидат геомагнітної бурі. Збурення магнітного поля Землі викликається інтенсивною геомагнітною бурєю. У цій роботі ми представили та проаналізували зміну  $H$ -компонента магнітного поля Землі на п'яти різних магнітометричних станціях по всьому світу під час трьох інтенсивних геомагнітних бур. Унікальні особливості геомагнітної бурі також описуються за допомогою  $z$ -компонента міжпланетного магнітного поля (ММП- $B_z$ ), параметрів сонячного вітру ( $v_{sw}$ ,  $N_{sw}$  і  $P_{sw}$ ) і геомагнітного індексу ( $SYM-H$ ). У результаті ми отримали такі висновки.

Кожна з вибраних подій у нашому дослідженні демонструє, що  $z$ -компонент ММП повертається на південь, щоб розпочати початкову фазу, і безперервно рухається на південь до фази відновлення. Це означає, що геомагнітні бурі сильно залежать від  $z$ -компонента ММП. Зв'язок між ММП- $B_z$  і  $SYM-H$  підтверджує, що орієнтоване на південь поле ММП- $B_z$  знову з'єднується з денною магнітосферою, що посилює кільцевий струм і, нарешті, відбувається екстремальне зменшення  $SYM-H$ . Перед початковою фазою деякі події SSC викликають збурення струму магнітопаузи. Оскільки інтенсивність струму магнітопаузи стає все більшою і більшою, відповідний результат можна відзначити як незначне збільшення компонента  $H$  магнітного поля Землі, що можна помітити з кривої варіації  $H$  у нашому дослідженні. Серед п'яти магнітометричних станцій станція Какаду, розташована на австралійському континенті (південна півкуля), зафіксувала більшу кількість депресій, ніж північні станції. Це вказує на те, що у південній півкулі варіації геомагнітного поля є більшими, ніж у північній півкулі [36]. Екваторіальний кільцевий струм відіграв важливу роль на низьких широтах у регулюванні коливань  $H$ -компонента, оскільки всі станції відзначили значне зменшення значень  $H$ -компонента порівняно зі станцією Ебро у середній широті під час геомагнітної бурі. Значна негативна кореляція  $H$  із кільцевим струмом і струмом вздовж поля вказує на те, що магнітне поле Землі керується системами магнітосферних струмів. Негативна кореляція з  $FAC$  створює можливість того, що не тільки кільцевий струм є причиною збурення магнітного поля Землі, але  $FAC$  також робить помітний внесок. Велике збільшення  $FAC$  перед основною фазою геомагнітної бурі можна розглядати як індикатор геомагнітного збурення.



## ПОДЯКИ

Ми дякуємо джерелам даних Intermagnet (<https://intermagnet.org/>) і OMNIweb (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>).

Саруп Хадка Саурав дякує Крішна Прасад Паудел і Тек Бахадур Хадка за допомогу під час роботи.

## REFERENCES

1. Adhikari B. (2015) *Hilda-related effects recorded in middle low latitude magnetometers*. PhD Thesis, Sao Jose dos Campos, Brasil.
2. Adhikari B., Dahal S., Sapkota N., Baruwal P., Bhattarai B., Khanal K., Chapagain N. P. (2018) Field-aligned current and polar cap potential and geomagnetic disturbances: A review of cross-correlation analysis. *Earth and Space Sci.* 5. 440—455.
3. Alex S., Mukherjee S., Lakhina G. (2006) Geomagnetic signatures during the intense geomagnetic storms of 29 October and 20 November 2003. *J. Atmos. and Solar-Terres. Phys.* 68. 769—780.
4. Astafyeva E., Zakharenkova I., Huba J., Doornbos E., Van den IJssel J. (2017) Global ionospheric and thermospheric effects of the June 2015 geomagnetic disturbances: Multi-instrumental observations and modeling. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 122.
5. Baker D. N., Jaynes A. N., Kanekal S. G., Foster J. C., Erickson P. J., Fennell J. F., Blake J. B., Zhao H., Li X., Elkington S. R., Henderson M. G. (2016) Highly relativistic radiation belt electron acceleration, transport, and loss: Large solar storm events of March and June 2015. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 121. 6647—6660.
6. Birkeland K. (1913) *The Norwegian aurora polaris expedition 1902—1903*. H. Aschelhoug & Company.
7. Burlaga L., Sittler E., Mariani F., Schwenn R. (1981) Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios, and IMP 8 observations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 86. 6673—6684.
8. Chen B., Xu W., Chen G., Du A., Wu Y., Liu X. (2009) Latitudinal shift and tilt of the ring current during magnetic storms. *Chi. Sci. Bul.* 54. 95—103.
9. Daglis I. A., Thorne R. M., Baumjohann W., Orsini S. (1999) The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay. *Revs. Geophys.* 37. 407—438.
10. De Abreu A. J., Fagundes P. R., Gende M., Bolaji O. S., De Jesus R., Brunini C. (2014) Investigation of ionospheric response to two moderate geomagnetic storms using GPS-TEC measurements in the South American and African sectors during the ascending phase of solar cycle 24. *Adv. in Space Res.* 53. 1313—1328.
11. Gavoret J., Gibert D., Menvielle M., Le Mouél J. (1986) Long-term variations of the external and internal components of the Earth's magnetic field. *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 91. B5. 4787—4796.
12. Gillmor C. S., Spreiter J. R. (1997) *Discovery of the magnetosphere*. American Geophysical Union Washington D. C.
13. Gonzalez W. D., Tsurutani B. T. (1987) Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ( $D_{st} < 100$  nT). *Planet. and Space Sci.* 35. 1101—1109.
14. Gonzalez W. D., Joselyn J.-A., Kamide Y., Kroehl H. W., Rostoker G., Tsurutani B. T., Vasyliunas V. (1994) What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 99. 5771—5792.
15. Gonzalez W. D., Tsurutani B. T., De Gonzalez A. L. C. (1999) Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.* 88. 529—562.

16. Gonzalez W. D., Echer E., Clua-Gonzalez A., Tsurutani B. T. (2007) Interplanetary origin of intense geomagnetic storms ( $D_{st} < 100$  nT) during solar cycle 23. *Geophys. Res. Lett.* 34.
17. Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G., Xie H., Lepping R., Howard R. (2005) Solar source of the largest geomagnetic storm of cycle 23. *Geophys. Res. Lett.* 32.
18. Gosling J. T., Hildner E., MacQueen R. M., Munro R. H., Poland A. I., Ross C. L. (1974) Mass ejections from the Sun: A view from Skylab. *J. Geophys. Res.* 79. 4581—4587.
19. Gosling J. T., Russel C. T., Priest E. R., Lee L. C. (1990) Physics of magnetic flux ropes. *Geophys. Monogr.* 58.
20. Huang C.-S., Foster J., Goncharenko L., Erickson P., Rideout W., Coster A. (2005) A strong positive phase of ionospheric storms observed by the Millstone Hill incoherent scatter radar and global GPS network. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 110.
21. Iijima T., Potemra T. A. (1976) The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by triad. *J. Geophys. Res.* 81. 2165—2174.
22. Iijima T., Potemra T. A. (1976) Field-aligned currents in the dayside cusp observed by triad. *J. Geophys. Res.* 81. 5971—5979.
23. Iijima T., Potemra T. A. (1978) Large-scale characteristics of field-aligned currents associated with substorms. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 83. 599—615.
24. Kikuchi T., Hashimoto K. K., Nozaki K. (2008) Penetration of magnetospheric electric fields to the equator during a geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 113.
25. Kozyra J. U., Jordanova V. K., Borovsky J. E., Thomsen M. F., Knipp D. J., Evans D. S., McComas D. J., Cayton T. E. (1998) Effects of a high-density plasma sheet on ring current development during the November 2-6, 1993, magnetic storm. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 103. 26285—26305.
26. Lanza R., Meloni A. (2006) *The Earth's magnetic field*. Berlin Heidelberg: Springer.
27. Liu J., Wang W., Burns A., Yue X., Zhang S., Zhang Y., Huang C. (2016) Profiles of ionospheric storm-enhanced density during the 17 March 2015 great storm. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 121. 727—744.
28. MacQueen R. M., Eddy J. A., Gosling J. T., Hildner E., Munro R. H., Newkirk G. A. Jr, Poland A. I., Ross C. L. (1974) The outer solar corona as observed from Skylab: Preliminary results. *Astrophys. J.* 187.
29. Marques de Souza A., Echer E., Bolzan M. J. A., Hajra R. (2018) Cross-correlation and cross-wavelet analyses of the solar wind IMF Bz and auroral electrojet index AE coupling during hildcaas. *Ann. Geophys.* 36. 205—211.
30. Østgaard N., Germany G., Stadsnes J., Vondrak R. R. (2002) Energy analysis of substorms based on remote sensing techniques, solar wind measurements, and geomagnetic indices. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 107.
31. Ramsingh, Sripathi S., Sreekumar S., Banola S., Emperumal K., Tiwari P., Kumar B. S. (2015) Low-latitude ionosphere response to super geomagnetic storm of 17/18 March 2015: Results from a chain of ground-based observations over Indian sector. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 120.
32. Sapkota S., Saurav S. K., Gautam S., Karki M., Adhikari B., Mishra R. K., Klausner V., Dhungana B. M. (2022) Analysis of Y-component of geomagnetic field and SYM-H index using wavelet multiresolution analysis. *Geomagn. Aeron.* 62. 125—137.
33. Shinbori A., Tsuji Y., Kikuchi T., Araki T., Ikeda A., Uozumi T., Baishev D., Shevtsov B. M., Nagatsuma T., Yumoto K. (2012) Magnetic local time and latitude dependence of amplitude of the main impulse (MI) of geomagnetic sudden commencements and its seasonal variation. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 117.

34. Smith E. J., Slavin J. A., Zwickl R. D., Bame S. J. (1986) *Shocks and storm sudden commencements. Solar wind-magnetosphere coupling*. Eds Y. Kamide, J. A. Slavin, Terra Pub., Tokyo 126. 345-365
35. Tsurutani B. T., Gonzalez W. D., Tang F., Akasofu S. I., Smith E. J. (1988) Origin of interplanetary southward magnetic fields responsible for major magnetic storms near solar maximum (1978—1979). *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 93. 8519—8531.
36. Turner N. E., Baker D., Pulkkinen T., Roeder J., Fennell J., Jordanova V. (2001) Energy content in the storm time ring current. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 106. 19149—19156.
37. Verkhoglyadova O., Tsurutani B., Mannucci A., Mlynczak M., Hunt L., Paxton L., Komjathy A. (2016) Solar wind driving of ionosphere-thermosphere responses in three storms near St. Patrick's day in 2012, 2013, and 2015. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 121. 8900—8923.
38. Veselovsky D., Zhukov Y., Kuznetsov C., Ishkov B., Eroshenko Y., Gaidash K., Kuzin Z., Ignat'ev S., Sukhodrev S., Eselevich M., Eselevich V. (2005) A year later: Solar, heliospheric, and magnetospheric disturbances in November 2004. *Geomagn. and Aeron.* 45. 681—719.
39. Wanliss J. A., Showalter K. M. (2006) High-resolution global storm index: Dst versus SYM-H. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 111.
40. Williams D. J. (1985) Dynamics of the Earth's ring current: Theory and observation. *Space Sci. Rev.* 42. 375—396.
41. Zhao H., Li X., Baker D., Fennell J., Blake J., Larsen B. A., Skoug R. M., Funsten H. O., Friedel R. H. W., Reeves G. D., Spence H. E. (2015) The evolution of ring current ion energy density and energy content during geomagnetic storms based on Van Allen Probes measurements. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 120. 7493—7511.

Sabin Gautam<sup>1,3</sup>, Sarup Khadka Saurav<sup>2</sup>, Binod Adhikari<sup>2,4</sup>,  
Santosh Sapkota<sup>1</sup>, Parashu Ram Poudel<sup>1</sup>, Roshan Kumar Mishra<sup>4</sup>,  
Chhabi Kumar Shrestha<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Prithvi Narayan Campus, Tribhuvan University, Nepal

<sup>2</sup>Patan Multiple Campus, Tribhuvan University, Nepal

<sup>3</sup>Pokhara Astronomical Society (PAS), Nepal

<sup>4</sup>Department of Physics, St. Xaviers' college, Nepal

#### VARIATION OF THE $H$ COMPONENT OF GEOMAGNETIC FIELD: RELATIONSHIP TO THE RING AND FIELD ALIGNED CURRENTS

Disturbance of equatorial ring current during the geomagnetic storm has dominant effect on geomagnetic field. The short term irregular variation on geomagnetic field is characterized by interaction of solar-wind magnetic field and Earth's magnetosphere, which develops time varying current in magnetosphere and ionosphere. This study represents the irregular variation on  $H$  component of Earth's magnetic field during three intense geomagnetic storm events. Among the five selected stations, four are at low-latitude and remaining one is at middle latitude. All the stations recorded the maximum depression on  $H$  component during the main phase of storm but sudden storm commencements (SSCs) event before initial phase caused slight increase in magnitude. In each of the event, low-latitude stations recorded large perturbation on magnetic field as compared to the middle latitude station. This result supports the intensification of ring current as initiated by the transfer of plasma and energy through interplanetary coronal mass ejections (ICMEs) and finally causes falling off of  $H$  component. Kakadu station (southern latitude) showed maximum value of  $H$  in second and third event, this result keeps up that mostly southern hemisphere station mea-

sures large decline on H component during storm time. The calculated value of ring current and field aligned current (*FAC*) showed extreme negative correlation with *H*. This unique result reveals that ring current is not only a factor that cause disturbance on horizontal component of Earth's magnetic field but *FAC* also has considerable effect.

**Key words:** geomagnetic storms, geomagnetic field, ring current, field aligned current.

Стаття надійшла до редакції 01.02.2022

Після доопрацювання 01.08.2022

Прийнята до друку 12.10.2022