

УДК 550.385

Ю. П. Сумарук

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, Київ

Геомагнітна активність та динаміка секторної структури міжпланетного магнітного поля

Представлено 03.09.07

Показано, що з ростом сонячної активності двосекторна структура міжпланетного магнітного поля перетворюється у багатосекторну. За даними середньоширотної обсерваторії продемонстровано залежність геомагнітної активності від зміни секторної структури.

ВСТУП

Основним параметром сонячного вітру, який визначає рівень геомагнітної активності, є орієнтація і величина міжпланетного магнітного поля (ММП). Найбільш інтенсивні геомагнітні збурення спостерігаються при проходженні біля Землі швидкісних потоків плазми з вмороженими у них магнітними полями Сонця, які мають південну ($B_z < 0$) складову, спрямовану проти-лежно силовим лініям дипольного поля Землі.

Необхідною умовою розвитку геомагнітної бурі є тривале підсилення магнітосферно-іоносферної конвекції [11]. Конвекція підсилюється при наявності в сонячному вітрі південної складової ММП [10, 17]. У спокійному сонячному вітрі B_z близька до нуля [16]. Для генерації суттєвої B_z -складової в сонячному вітрі повинна появиться неоднорідність. Така неоднорідність може створитися корональними викидами маси [13], взаємодією між корпускулярними потоками [5] та ін.

Важливою особливістю ММП є секторна структура, тобто збереження напрямку поля у площині екліптики від Сонця або до Сонця відносно лінії Сонце — Земля протягом декількох діб, і яка обертається разом з Сонцем. У

спокійних умовах переважає двосекторна структура, яка ускладнюється в збурених умовах при появі на Сонці активних областей. Активні області зароджуються на Сонці переважно поблизу секторних границь [4, 5], що веде до появи так званих активних довгот [12]. На границях секторної структури збільшуються флюктуації вертикальної складової [9], підсилюється геомагнітна активність [14].

Метою роботи є вивчення залежності геомагнітної активності від зміни секторної структури ММП. Для дослідження вибрано інтервал часу з 1 липня 1966 р. до 28 травня 1974 р., один з найспокійніших у двадцятому столітті. Це дає можливість прослідкувати за зміною секторної структури. В даному інтервалі часу ряди даних про ММП найбільш повні.

ВИКОРИСТАНІ ДАНІ

Середньогодинні значення складових ММП у сонячно-екліптичній системі координат взяті із каталогу Кінга [15] і узгоджені з даними Свальгарда [20], який визначав знак сектора ММП за наземними даними. Дані про сонячні спалахи одержані з каталогу [3]. Мірою геомагнітної

активності вибрані добові суми відхилень середньогодинних значень горизонтальної складової поля на середньширотній обсерваторії «Львів» ($\lambda = 49.90^\circ$, $\varphi = 23.75^\circ$) від відповідних середніх значень цієї ж складової по п'яти міжнародно-спокійних днях ($\Sigma(H-S_q)$). Як показано в роботі [19], величина $\Sigma(H-S_q)$ добре корелює з виправленими АЕ-індексами магнітної активності [8] як у спокійних, так і у збурених умовах.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В досліджуваному інтервалі часу відбулось 106 обертів Сонця навколо його осі, з них у 62 обертах спостерігалась двосекторна структура ММП, у 44 обертах двосекторна структура порушувалась і ставала багатосекторною.

Як зазначалось в роботі [6], у варіаціях секторної структури можна виділити три типи динамічних процесів: перший — поступове зародження нового сектора протилежного знаку в межах існуючого протягом кількох обертів Сонця; другий — поступове зменшення тривалості сектора і повне його зникнення; третій — зміщення границь між секторами, як за годинниковою стрілкою, так і проти неї. Рух границь між секторами за годинниковою стрілкою відповідає збільшенню тривалості попереднього сектора, проти годинникової стрілки — зменшення його тривалості. Пояснення таких змін секторної структури можна дати, використавши модель дископодібного струму, який оточує Сонце. Він розміщений його екваторіальній площині і ділить міжпланетне середовище з додатним і від'ємним напрямками ММП [18]. Хвилеподібна деформація цього струму веде до того, що супутник, який рухається за межами магнітосфери, позмінно знаходиться то північніше, то південніше дископодібного струму і спостерігає зміну знаку радіальної складової ММП.

Квазістаціонарні корпускулярні потоки сонячного вітру, а також потоки плазми від сонячних спалахів деформують дископодібний струм [2], що веде до варіацій секторної структури ММП. Поступове зародження нового сектора в межах існуючого у більшості випадків проявляється як порушення структури.

На рис. 1 показано зародження від'ємного сектора в 1840—1844-му обертах Сонця. Зарод-

ження його відмічено квадратними дужками. По осі абсцис відкладені дати, по осі ординат — кут Φ , який показує відхилення радіальної складової ММП від напрямку на Сонце. Кут Φ відраховується проти годинникової стрілки в градусах. В спокійних умовах ММП в площині екліптики напрямлене по спіралі Архімеда, тобто кут між ММП та напрямком на Сонце повинен бути рівним 135° (додатний сектор) або 315° (від'ємний сектор). На рис. 1 поява додатного сектора показана суцільною напрямленою вниз стрілкою, від'ємного — вгору. Сектором називаємо таку структуру ММП, у якій значення радіальної складової поля лягають в один і той же квадрант координатної сітки не менше трьох діб. Якщо напрямок поля змінюється за інтервал часу, менший за три доби — це є відхилення від секторної структури (показано на рис. 1 пунктирними вертикальними стрілками). Зліва вгору нанесено номер оберту Сонця по Бартельсу, справа знак сектора. Верхній ряд послідовних чисел — номер дня в кожному оберті. Під кривою значень Φ нанесені значення величин $\Sigma(H-S_q)$ в цей же день. Тут же показано наявність спалахів на Сонці у ближній (Б), проміжній (П) та дальній (Д) зонах Сонця. Позначення зон взято із роботи [3]. Ближня зона відраховувалась від екватору Сонця по геліошироті до $\pm 15^\circ$, проміжна — від $\pm 15^\circ$ до $\pm 30^\circ$, а дальня — від $\pm 30^\circ$ і до полюсів. Геліопроекція Землі завжди перебувала на нульовому меридіані і на екваторі Сонця.

Рис. 1 показує, що в 1840-му оберті Сонця спостерігалась типова спокійна двосекторна структура ММП. 28 січня 1840 р. відбулась зміна знаку сектора з додатного на від'ємний, яка супроводжувалась серією із шістнадцяти сонячних спалахів в проміжній зоні. 5—10 лютого спалахи не спостерігались. 11 лютого знак сектора знову помінявся на додатний, за яким відбулася серія з семи спалахів у ближній та проміжній зонах. Даний сектор стає нестабільним. 16 лютого, у 1841-му оберті у межах додатного сектора поле змінило знак на короткий проміжок часу. У 1842-му оберті Сонця це відхилення було тривалішим (14—16 березня) і фактично стало новим від'ємним сектором під час 1843—1844 обертів. Надалі структура стала багатосекторною. Уже у 1845-му оберті спостерігаються дві потужні серії сонячних спа-

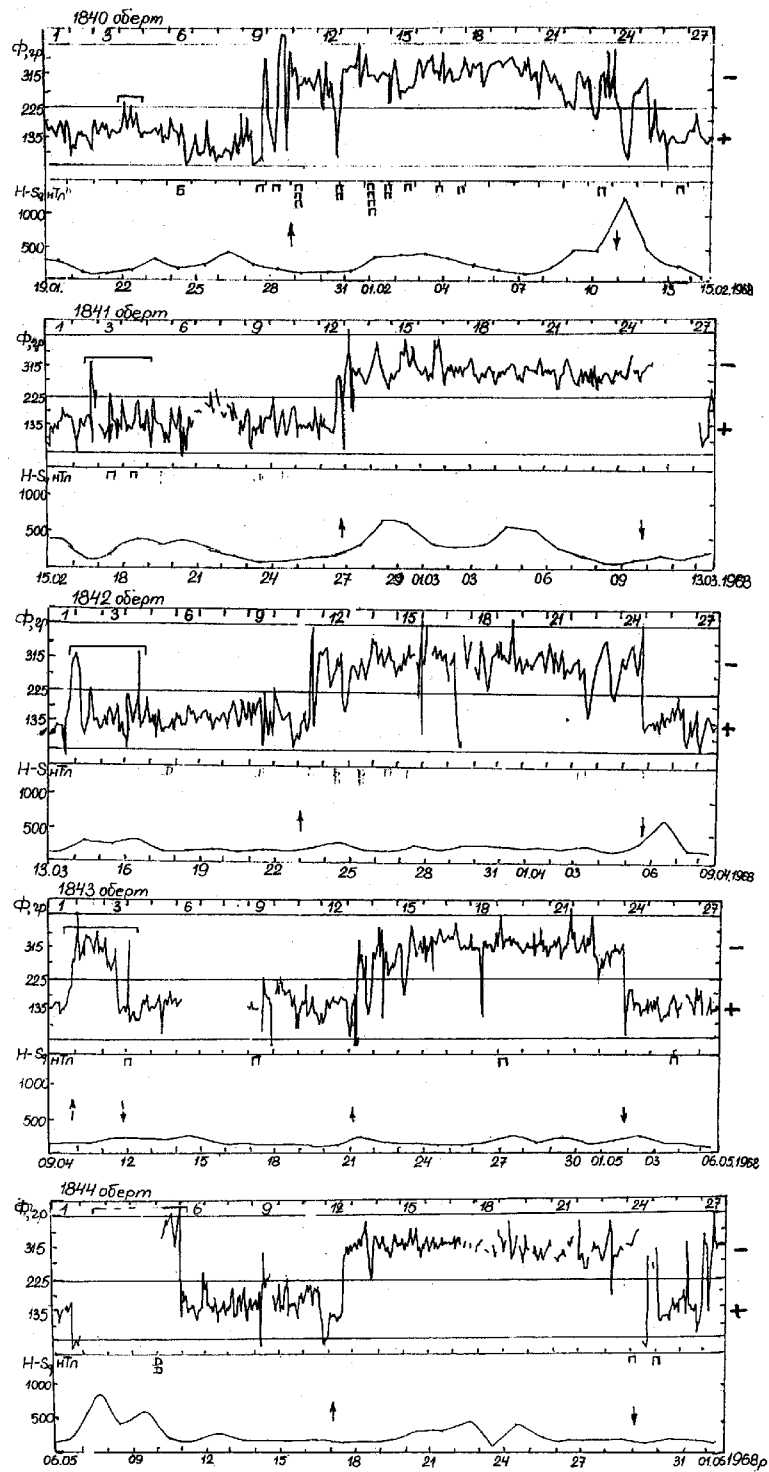


Рис. 1. Зміна відхилення радіальної складової ММП від напрямку на Сонці (Φ) протягом 1840—1844-го обертів Сонця та зміна геомагнітної активності ($H-S_Q$) за цей же період

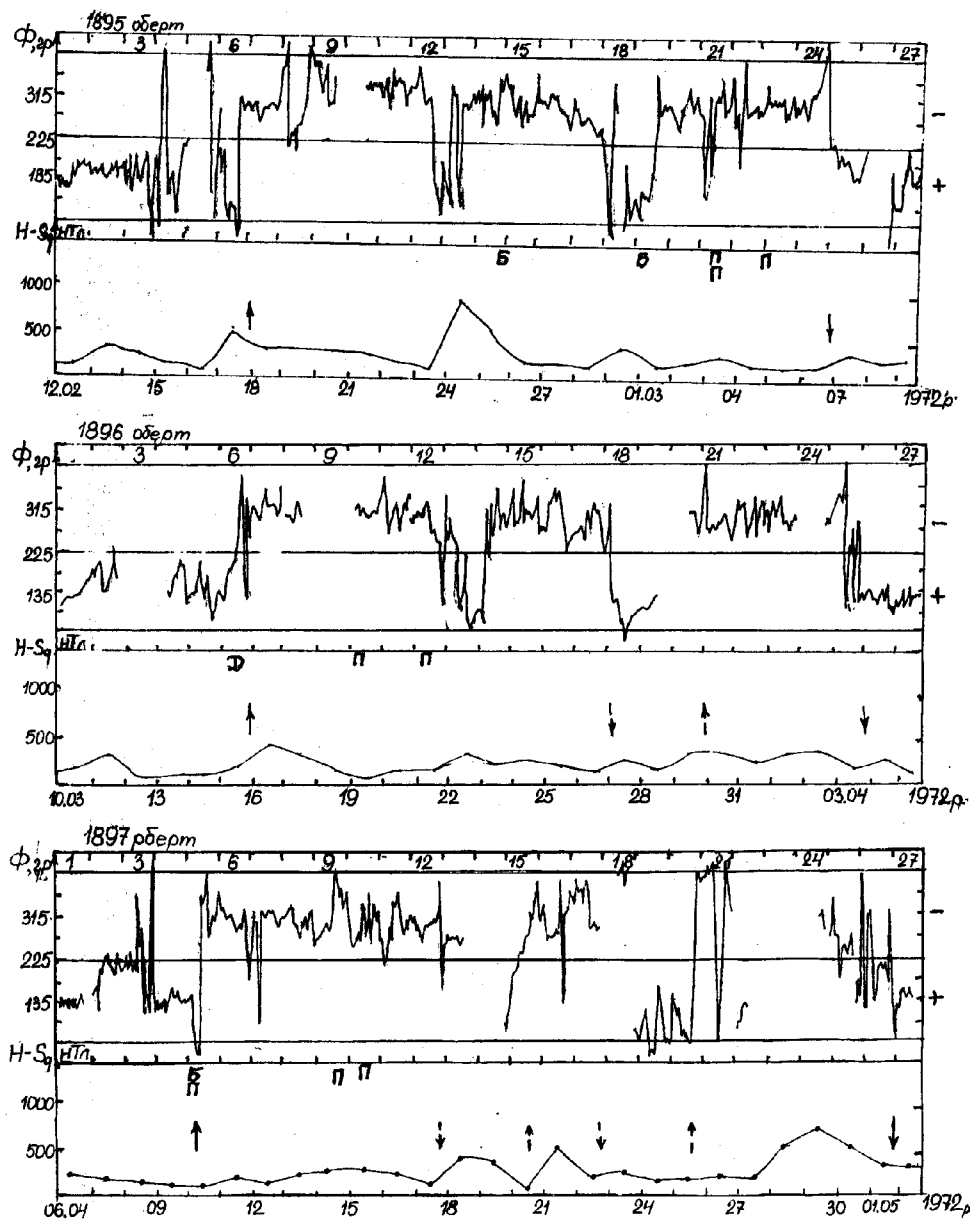


Рис. 2. Приклад дестабілізації двосекторної структури та її перехід у багатосекторну

лахів: 20 спалахів з 2 до 14 червня 1968 р. та шість спалахів з 17 до 21 червня. Як можна бачити з рис. 1, зміни знаків секторів ММП, а також відхилення від секторної структури веде до значного росту геомагнітної активності, що добре видно на кривих зміни $H-S_q$. Перехід

двосекторної структури у багатосекторну супроводжується значним ростом активності.

В 1840—1844-му обертах спостерігалися переміщення границь секторів як за годинниковою стрілкою, так і проти неї.

На рис. 2 показано типовий приклад де-

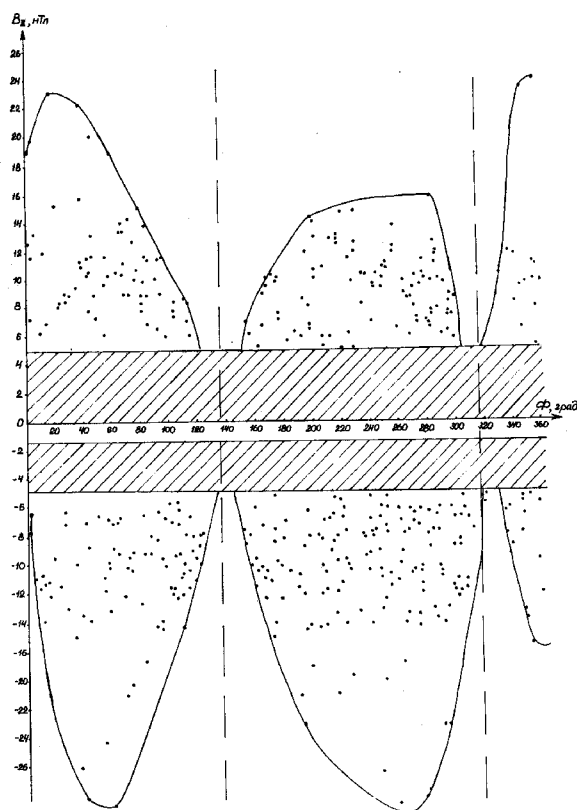


Рис. 3. Залежність величини вертикальної складової ММП від напрямку поля у площині екліптики

стабілізації двосекторної структури та її перехід у багатосекторну та впливу короткочасних відхилень ММП від секторної структури на величину геомагнітного збурення під час 1895—1897-го обертів Сонця. Від'ємний сектор ММП, який спостерігається з 18 лютого до 7 березня 1972 р. в 1895-му оберті Сонця переривався відхиленнями у додатній сектор 24—25 лютого, 29 лютого—1 березня та 3—5 березня. З першим відхиленням зв'язана помірна геомагнітна буря ($\Sigma(H-S_q) = 901$ нТл), друге та третє — зі збуреннями $\Sigma(H-S_q) = 180$ та 228 нТл відповідно. Всі відхилення супроводжувались сонячними спалахами у ближній та проміжній зонах Сонця. При зміні знаку сектора 18 лютого та 7 березня також спостерігались магнітні бурі ($\Sigma(H-S_q) = 570$ та 588 нТл). В наступних обер-

тах тривалість відхилень значно збільшилась, і двосекторна структура трансформувалась у багатосекторну, яка проіснувала на протязі п'яти обертів Сонця, і тільки в 1901-му оберті структура стала двосекторною, причому початок розглядуваного від'ємного сектора, який спостерігався 18 лютого, перемістився за годинниковою стрілкою на дев'ять днів. У цей інтервал часу, під час 1899-го оберту Сонця 18—20 червня 1972 р., спостерігалась дуже велика магнітна буря (максимальне значення $\Sigma(H-S_q) = 2093$ нТл).

Оскільки стабільність секторної структури ММП зв'язана з активністю Сонця, поява перпендикулярної до екліптики складової ММП, повинна залежати від напрямку ММП у площині екліптики.

На рис. 3 показано залежність величини вертикальної складової ММП за весь досліджуваний інтервал часу від напрямку поля у площині екліптики, положення спіралі Архімеда відмічені вертикальними штриховими лініями. Величина B_z зростає під час відхилень ММП в площині екліптики від спіралі Архімеда та на границях секторів. Величина напруженості ММП в такі проміжки часу також значно збільшується. Максимальних значень $|B_z|$ набуває при $\Phi = 20...60^\circ$ та $220...260^\circ$. У спокійних умовах $|B_z| \leq 5$ нТл і не викликає великих геомагнітних збурень. На рис. 3 площа при $|B_z| \leq 5$ нТл заповнена косими лініями. В ті інтервали часу, коли порушення секторної структури супроводжується великими додатними значеннями B_z , в зоні полярних сьвів та в середніх широтах магнітних збурень не спостерігається. При $B_z > 0$ відбувається перез'єднання ММП і силових ліній дипольного поля в районі каспів [1]. Магнітопауза в такі години віддаляється від Землі, широта каспів збільшується, а у полярних шапках Землі спостерігається особливий тип геомагнітних варіацій [7].

На рис. 4 показана сумарна картина розвитку секторної структури ММП за 1819—1858 обертів Сонця. Номери обертів нанесені зліва. Початок додатного сектора позначено стрілкою, напрямленою вниз, від'ємного — вгору, штрихові стрілки — зародження нового сектора в межах попереднього. Косими лініями затемнені дні, коли спостерігались відхилення від секторної структу-

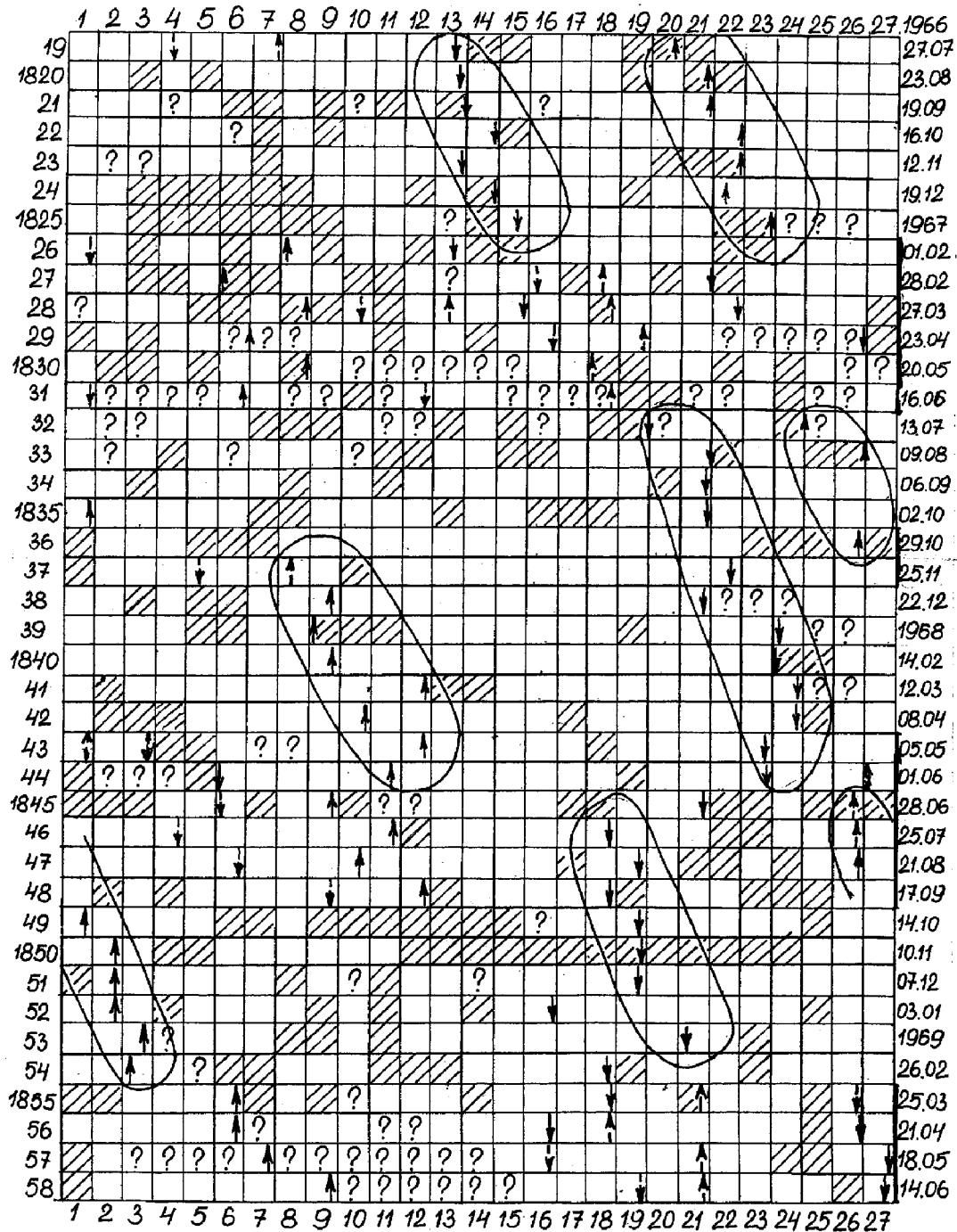


Рис. 4. Сумарна картина розвитку секторної структури ММІ у 1819—1858-му обертах Сонця

ри, знаки запитання — напрямок ММП невідомий. Дати останнього дня відповідного оберту показані справа, послідовна нумерація днів в обертах нанесена вгорі і знизу. Оберти Сонця, у яких спостерігалась багатосекторна структура, відмічені на рис. 4 справа товстими лініями.

На початку 1819-го оберту Сонця спостерігалась серія із одинадцяти спалахів в дальній зоні Сонця, що призвело до утворення п'ятисекторної структури та помірної магнітної бурі 8—10 липня 1966 р. В наступному 1820-му оберті Сонця кількість спалахів зменшилась, і секторна структура стабілізувалась. Двосекторна структура зберігалась в 1820—1825-му обертах Сонця. Однак при появі сонячних спалахів спостерігались відхилення від секторної структури. У 1821-му оберті 29 серпня о 22 годині UT спостерігався екскурс поля з від'ємного сектора у додатний на 8 годин, після якого на Землі спостерігалась велика магнітна буря ($\Sigma(H-S_q) = 752$ нТл). Така ж подія відбулась у цьому секторі 3—5 вересня, що призвело до дуже великої магнітної бурі ($\Sigma(H-S_q) = 1727$ нТл).

На кінець 1825-го та протягом 1826—1831-го обертів кількість спалахів на Сонці значно зростає. Спостерігались серії із 17, 23 і 25 спалахів [3]. Секторна структура ММП у 1826—1831-му обертах стала багатосекторною. Двосекторна структура відновилась у 1832-му оберті. На Землі в цей час спостерігались малі магнітні бурі ($\Sigma(H-S_q) \leq 600$ нТл). Така ж послідовність подій відбувалась протягом наступних обертів Сонця у всьому інтервалі часу. На рис. 4 положення однієї і тієї ж границі між секторами у послідовних обертах Сонця окреслено суцільною замкнутою лінією.

ВИСНОВКИ

Аналіз секторної структури ММП за період з 1 липня 1966 р. до 28 травня 1974 р. показав, що зміна знаку сектора ММП, а також недовготривалі порушення секторної структури, тобто відхилення поля від напряму по спіралі Архімеда, ведуть до генерації вертикальної складової ММП. Максимальних значень $|B_z|$ складова ММП набуває при значеннях кута $\Phi = 20...60^\circ$ в додатному секторі та $220...260^\circ$ — у від'ємному секторі ММП. Збільшення сонячної активності

веде до перебудови двосекторної структури в багатосекторну, до появи $|B_z|$ -складової ММП значної величини і до збільшення геомагнітної активності.

1. Бельская Е. С. Структура магнитосферного магнитного поля при различных направлениях магнитного поля солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрон.—2004.—44, № 4.—С. 435—441.
2. Бобров М. С. О деформации плоскости токового слоя потоками солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрон.—1980.—20, № 5.—С. 929—932.
3. Иванов К. Г., Микерина Н. В., Завойкина А. И., Трещеткина В. М. Каталог вспышечных ситуаций 1966—1974 гг. применительно к межпланетным и магнитосферным возмущениям. — М.: ИЗМИРАН, 1979.—63 с.
4. Иванов К. Г., Харшиладзе А. Ф. Серия солнечно-земных экстрабурь мая—октября 2000 г. 1. Структура и динамика открытого магнитного поля Солнца // Геомагнетизм и аэрон.—2004.—44, № 1.—С. 3—8.
5. Иванов К. Г., Харшиладзе А. Ф. Серия солнечно-земных экстрабурь мая—октября 2000 г. 2. Открытое магнитное поле и солнечные пятна // Геомагнетизм и аэрон.—2004.—44, № 2.—С. 147—154.
6. Сумарук П. В. Вариации секторной структуры межпланетного магнитного поля // Солнеч. данные.—1984.—№ 6.—С. 74—80.
7. Сумарук П. В., Левитин А. Е., Фельдштейн Я. И. и др. Вариации магнитного поля, продольных токов и электрических полей в период $B_z > 0$ компоненты ММП // Геофиз. журн.—1987.—9, № 1.—С. 11—20.
8. Сумарук П. В., Сумарук Ю. П. Индексы магнитной активности АЕ во время магнитной бури // Геофиз. журн.—1994.—16, № 4.—С. 51—53.
9. Сумарук П. В., Фельдштейн Я. И. Изменчивость Z_{SE} составляющей ММП на границе секторной структуры // Астрон. вестник.—1973.—7.—С. 111—113.
10. Arnoldy R. L. Signature in the interplanetary medium for substorm // J. Geophys. Res.—1971.—76.—P. 5189—5202.
11. Axford W. L., Hines C. O. A unifying theory of high-latitude geophysical phenomena and geomagnetic storms // Can. J. Phys.—1961.—39.—P. 1433—1443.
12. Bumba V., Obridko V. N. «Bartels» active longitudes, sector boundaries and flare activity // Solar Phys.—1969.—6, N 1.—P. 104—110.
13. Gonzalez W. D., Joselyn J. A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res.—1994.—99.—P. 5771—5792.
14. Hirshberg J., Colburn D. S. Geomagnetic activity at sector boundary // EOS.—1973.—54.—P. 425—430.
15. King J. R. Interplanetary Medium Data Book. — WDC-A, Rockets and Satellites.—1977.—385 p.
16. Ness N. F., Wilcox J. M. Extension of photospheric magnetic field into interplanetary space // Astrophys. J.—1966.—143, N 1.—P. 23—35.
17. Rostoker G., Faethammar C. G. Relationship between changes in the IMF and variations in the magnetic field at

- the Earth surface // *J. Geophys. Res.*—1967.—72.—P. 5853—5863.
18. Smith E. J., Tsurutani B. T., Rosenberg R. L. Observations of the interplanetary sector structure up to heliographic latitude of 16°: Pioneer-11 // *J. Geophys. Res.*—1978.—83.—P. 717—724.
19. Sumaruk T., Sumaruk Yu. A new index of geomagnetic activity // Program and abstracts XII IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing, Belsk, Poland, June 19—24, 2006.—P. 58.
20. Svalgaard L. On the use of Godhavn H-component as an indicator of the interplanetary sector structure // *J. Geophys. Res.*—1975.—80, N 19.—P. 2717—2722.

**GEOMAGNETIC ACTIVITY AND DYNAMICS
OF SECTOR STRUCTURE OF THE INTERPLANETARY
MAGNETIC FIELD**

Yu. P. Sumaruk

It is shown that two-sector structure of the interplanetary magnetic field developed to multisector one with solar activity increasing. The dependence of geomagnetic activity on the sector structure change is revealed on the basis of middle latitude observatory data.