

УДК 550.385

Ю. П. Сумарук

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

ЗАЛЕЖНІСТЬ ВЕЛИЧИНИ ВАРІАЦІЙ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ВІД ПОЧАТКОВОГО СТАНУ МАГНІТОСФЕРНО-ІОНОСФЕРНОЇ СИСТЕМИ

Досліджується залежність варіацій геомагнітного поля в авроральних широтах від початкового стану магнітосферно-іоносферної системи струмів у фазу розвитку великої магнітної бурі. Показано, що інтенсивність західного аврорального іоносферного електроструменя контролюється інтегральним за інтервал в декілька годин параметрами сонячного вітру. Чим більша інтенсивність магнітного збурення у початковий момент, тим більша чутливість системи струмів до зміни параметрів сонячного вітру.

Величина варіацій геомагнітного поля залежить від кількості енергії сонячного вітру, яка поступила у магнітосферу. Передача енергії із сонячного вітру у магнітосферу може проходити шляхом переєднання в замороженому плазмі сонячного вітру міжпланетного магнітного поля з магнітним полем земного диполя [10] або ж «в'язкої» взаємодії між сонячним вітром та магнітосферою [8]. Вважається, що близько 90 % енергії поступає у магнітосферу через процеси переєднання, і тільки 10 % шляхом «в'язкої» взаємодії [9]. Розвиток магнітних бур і суббур обумовлений появою біля магнітосфери південної ($B_z < 0$) складової міжпланетного магнітного поля (ММП), що веде до інтенсифікації названих вище процесів і до збільшення інтенсивності як західного, так і східного авроральних електроструменів [13, 14]. Наростання магнітної активності починається приблизно через 15 хв після появи південної складової ММП $B_z < 0$ [12], а максимальна кореляція між B_z і AE -індексом магнітної активності спостерігається, якщо B_z випереджає AE на 40 хв [11, 12]. Для розвитку світових магнітних бур потрібна триваліша дія складової ММП $B_z < 0$. При цьому B_z не повинна бути меншою за 3–5 нТл [16]. На графіках залежності індексів авроральних електроструменів від параметрів міжпланетного середовища видно, що при однако-

вих значеннях цих параметрів величини індексів значно відрізняються. Причиною такого розсіювання може бути те, що реакція магнітосферно-іоносферної системи струмів залежить від стану системи у момент взаємодії. Так, в роботі [7] виявлено залежність початку активної фази магнітосферної суббури від провідності іоносфери в той момент, коли параметри міжпланетного середовища ініціювали суббурю. В роботі [15] на прикладі декількох суббур показано, що інтенсивність відгуку магнітосферно-іоносферної системи струмів залежить від стану магнітосфери у момент зміни параметрів міжпланетного середовища. Виявилось, що інтенсивність індексів західного аврорального електроструменя AL у максимумі збурення визначається рівнем збуреності геомагнітного поля у момент появи південної B_z -складової ММП.

Метою даної роботи є дослідження змін індексу AL в залежності від початкового рівня геомагнітної збуреності для початку головної фази великої магнітної бурі 23 березня 1969 р. Бурю неодноразово вивчали [1, 3, 5]. Джерела цієї бурі досліджено детально в роботі [4]. Вибрано інтервал часу від 14:00 до 19:00 UT 23 березня, який починається появою південної складової ММП B_z , початком генерації кільцевого магнітосферного струму та незначною дисперсією B_z -складової ММП ($\sigma < 1$ нТл в середньогодинних значеннях). Закінчується інтервал в

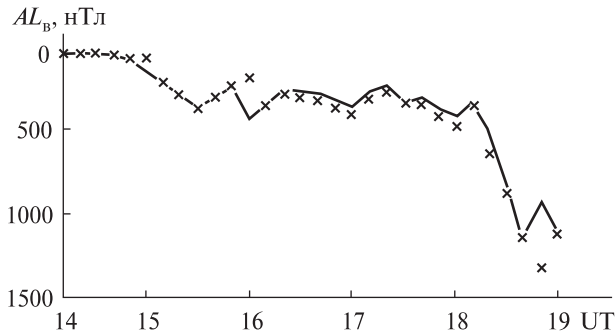


Рис. 1. Зміна індексу AL_0 на початку головної фази бурі. Суцільна крива — AL_0 -індекс обчислювався з використанням даних субавроральних обсерваторій, хрестики — з використанням H - і Z -складових авроральних обсерваторій

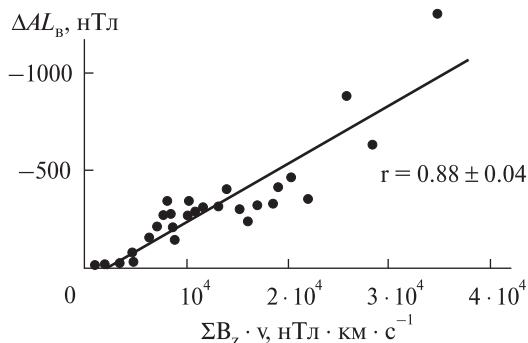


Рис. 2. Залежність змін індексу ΔAL_0 за десятихвилинні інтервали часу (для 30 інтервалів) від інтегральних величин електричного поля сонячного вітру $\Sigma B_{zn} \cdot v_n$. Прямая лінія — рівняння лінійної регресії, одержане методом найменших квадратів

19:00 UT, коли дисперсія ММП збільшується ($\sigma = 2.9$ нТл). Тобто для аналізу використано інтервал часу з достатньо стійким ММП. Це значить, що магнітосферно-іоносферна система була у стані, близькому до рівноважного. Значення AL -індекса визначались за кожний 10-хвилинний інтервал часу по довготньому ланцюжку авроральних і субавроральних обсерваторій.

Відомо [6], що іоносферні авроральні електрострумені (східний і західний) зміщуються по широті з підсиленням магнітної активності. Під час магнітних бур в магнітосфері генерується кільцевий струм, який деформує геомагнітні силові лінії, і внаслідок цього авроральні електростру-

мені зміщуються до екватора. Це значить, що індекси $AE = AL + AU$, обчислені за даними авроральних обсерваторій, будуть занижені, оскільки максимуми авроральних електроструменів перебуватимуть уже в зеніті субавроральних обсерваторій. Одержати виправлений індекс AE можна двома методами: перший — з використанням варіацій горизонтальної складової геомагнітного поля на субавроральних обсерваторіях, другий — за даними вертикальної (Z) і горизонтальної (H) складових авроральних обсерваторій. Ми використовували індекс AL , виправлений обома методами. Для першого методу, крім даних авроральних обсерваторій, були використані дані про варіації H -складової на субавроральних обсерваторіях Якутськ, Сент-Джонс, Оттава, Мінук і Ажінкурт. Другим методом індекс AL виправлено з використанням додаткових даних про варіації вертикальної складової тільки авроральних обсерваторій. При зміщенні аврорального електроструменя із зеніту магнітної обсерваторії (в зеніті значення ΔH — максимальне, а $\Delta Z = 0$) на невеликі відстані збурення реєструється не тільки в горизонтальній складовій, але й у вертикальній. При віддаленні електроструменя від зеніту обсерваторії повний вектор збурення $\Delta T = (\Delta H^2 + \Delta Z^2)^{1/2}$ зменшується обернено пропорційно віддалі до його центра. Вважаючи, що електрострумень зміщувався на невеликі віддалі, названим фактором нехтуємо.

На рис. 1 показані зміни індекса AL_0 для вибраного інтервалу з використанням обох методів виправлення (хрестики — з використанням ΔH та ΔZ). Бачимо добре узгодження величини AL_0 , отриманих обома методами. Зміну AL -індекса обчислюємо за співвідношенням $\Delta AL_0 = AL_0 - AL_{01}$, де AL_{01} — значення індекса AL_0 о 14:10 UT, тобто на початку досліджуваного інтервалу.

Кількість енергії, яка поступає у магнітосферу при наявності південної складової ММП можна оцінити за величиною електричного поля сонячного вітру за кожний десятихвилинний інтервал. Зміну повної енергії, переданої у магнітосферу, знаходимо як $F = \sum_1^n B_{zn} \cdot v_n$, де v_n — швидкість сонячного вітру в n -й момент часу, а B_{zn} — вертикальна складова ММП у цей же момент

часу. Відношення ΔAL_g до $\Sigma B_{zn} \cdot v_n$ показує зміну інтенсивності західного аврорального електроструменя при зміні напруженості електричного поля сонячного вітру на одиницю.

На рис. 2 показано залежність ΔAL_g від F для кожного 10-хв інтервалу із послідовно зростаючих по тривалості інтервалів часу ($n = 2...30$) від 14:20 до 19:00 UT. Бачимо, що зміна величини західного електроструменя на кожному інтервалі часу функціонально зв'язана з інтегральною величиною електричного поля, яке переноситься до магнітосфери за цей інтервал. Рівняння лінійної регресії, одержане методом найменших квадратів, має вигляд

$$\Delta AL_g^n = (0.030 \pm 0.001) \cdot \sum_{n=2}^{30} B_{zn} \cdot v_n - (53 \pm 13).$$

Коефіцієнт кореляції складає $r = 0.88 \pm 0.04$. Зв'язок між ΔAL_g і значеннями $B_{zn} \cdot v_n$ в той же момент часу і при випередженні $B_{zn} \cdot v_n$ індексу активності на інтервали, кратні 10 хв, характеризується меншою кореляцією, ніж для ΔAL_g з $\Sigma B_{zn} \cdot v_n$. У таблиці показано відповідні значення r і рівняння лінійної регресії.

Максимальний коефіцієнт кореляції в цьому випадку ($r = 0.72$) бачимо при випередженні дії сонячного вітру на геомагнітну активність на 40 хв. Але і це максимальне значення коефіцієнта кореляції значно менше, ніж значення коефіцієнта кореляції для ΔAL_g і $\Sigma B_{zn} \cdot v_n$. А це означає, що рівень магнітної збуреності визначається не тільки станом міжпланетного середовища в конкретний момент часу, але і станом цього середовища в інтервал часу тривалістю декілька годин.

Було обчислено відношення ΔAL_g до величини F для змінного часового інтервалу. Початок інтервалу змінювався з кроком в 10 хв з 14:10 до 18:20 UT. Відношення показує збільшення інтенсивності геомагнітного збурення на одиницю напруженості електричного поля сонячного вітру.

На рис. 3 показано залежність цього відношення від величини індекса AL_g . Чітко прослідковується збільшення відношення від інтенсивності західного електроструменя. Це значить, що магнітосферно-іоносферна система струмів стає все більше чутливою до величини енергії, яка

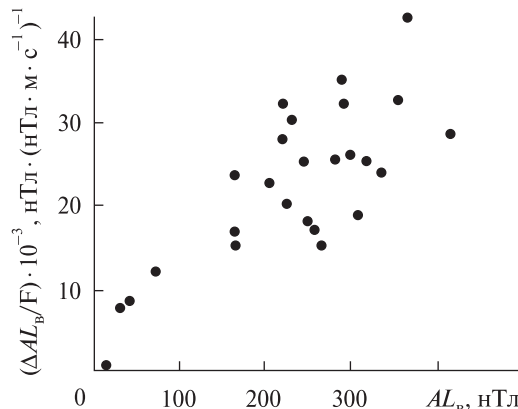


Рис. 3. Залежність відношення $\Delta AL_g / F$ від величини AL_g -індексу авроральної активності

Коефіцієнти кореляції і рівняння лінійної регресії між ΔAL_g і $B_z \cdot v$

$B_z \cdot v$ випереджає ΔAL_g , хв	r	Рівняння лінійної регресії ΔAL_g і $B_z \cdot v$
0	0.48 ± 0.17	$(0.19 \pm 0.06) \cdot B_z \cdot v - (77 \pm 68)$
10	0.45 ± 0.16	$(0.12 \pm 0.04) \cdot B_z \cdot v - (104 \pm 177)$
20	0.63 ± 0.12	$(0.24 \pm 0.05) \cdot B_z \cdot v - (19 \pm 56)$
30	0.62 ± 0.13	$(0.23 \pm 0.05) \cdot B_z \cdot v - (76 \pm 56)$
40	0.72 ± 0.10	$(0.28 \pm 0.04) \cdot B_z \cdot v - (70 \pm 55)$
50	0.58 ± 0.14	$(0.27 \pm 0.07) \cdot B_z \cdot v - (82 \pm 78)$
60	0.61 ± 0.13	$(0.30 \pm 0.06) \cdot B_z \cdot v - (100 \pm 67)$

передається із сонячного вітру у магнітосферу, і для генерації певного приросту збурення потрібно все менша кількість енергії.

Таким чином, що спокійніша магнітосферно-іоносферна система, тобто що менше значення AL_g -індекса, то менший рівень збуреності при певних значеннях параметрів сонячного вітру, і навпаки, що вищий початковий рівень збуреності системи, тим більша величина збурення при тих же значеннях параметрів сонячного вітру.

ВИСНОВКИ

1. Інтенсивність аврорального електроструменя контролюється інтегральним за інтервал в декілька годин параметрами сонячного вітру.
2. Чутливість магнітосферно-іоносферної системи до зміни параметрів сонячного вітру збільшується із збільшенням збуреності іоносфери.

3. Що більший початковий рівень збурення, тим більшою буде амплітуда наступної варіації при таких же змінах параметрів міжпланетного середовища.

1. Белов Б. А., Дремухина Л. А., Сумарук П. В. Вариации геомагнитного поля на средних и низких широтах во время геомагнитной бури 23–24 марта 1969 г. // Структура геомагнитных возмущений. — М.: ИЗМИРАН, 1989. — С. 31–41.
2. Сумарук П. В., Сумарук Ю. П. Индексы магнитной активности АЕ во время магнитной бури // Геофиз. журн. — 1994. — 16, № 4. — С. 51–53.
3. Сумарук П. В., Фельдштейн Я. И., Белов Б. А. Динамика магнитосферной активности в период интенсивной магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. — 1989. — 29, № 1. — С. 110–115.
4. Сумарук Ю. П. Динаміка джерел геомагнітних варіацій: Автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук. — Київ, 2001. — 20 с.
5. Фельдштейн Я. И., Сумарук П. В., Белов Б. А. Вариации геомагнитного поля в начале и на главной фазе геомагнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. — 1990. — 30, № 1. — С. 37–43.
6. Хорошева О. В. Связь возмущенности магнитосферы с параметрами межпланетной среды // Геомагнетизм и аэрономия. — 1986. — 26, № 3. — С. 447–453.
7. Akasofu S.-I., Kan J. R. Importance of initial ionospheric conductivity on substorm onset // Planet. Space. Sci. — 1982. — 12. — P. 1315–1322.
8. Axford W. I., Hines C. O. A unifying theory of high-latitude geophysical phenomena and geomagnetic storms // Can. J. Phys. — 1961. — 39. — P. 1443–1459.
9. Baumjohann W., Haerendel G. Dayside convection, viscous interaction and magnetic merging // Solar Wind — Magnetosphere Coupling / Eds Y. Kamide and A. Slavin. — Tokyo: Terra, 1986. — 230 p.
10. Dungey J. W. Interplanetary magnetic field and auroral zones // Phys. Rev. Lett. — 1961. — 6. — P. 47–56.
11. Foster J. G., Fairfield D. H., Ogilvie K. W., Rosenberg T. J. Relationship of the interplanetary parameters and occurrence of the magnetospheric substorms // J. Geophys. Res. — 1971. — 76, N 28. — P. 6971–6986.
12. Meng C.-I., Tsurutani B., Kawasaki K., Akasofu S.-I. Cross-correlation analysis of the AE-indices and IMF B_z component // J. Geophys. Res. — 1973. — 78, N 4. — P. 617–628.
13. Perrault P., Akasofu S.-I. A study of geomagnetic storms // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. — 1978. — 54. — P. 547–573.
14. Pytte T., McPherron R. L., Hones E. W., Jr., West H. I., Jr. Multiple-satellite studies of magnetospheric substorms: Distinction between polar magnetic substorms and convection driven bays // J. Geophys. Res. — 1978. — 83, N 2. — P. 663–683.
15. Rostoker G., Savoie D., Phan T. D. Response of magnetosphere — ionosphere current systems to changes in the interplanetary magnetic field // J. Geophys. Res. — 1988. — 93, N 8. — P. 8633–8641.
16. Russell C. T., McPherron R. L., Burton R. K. On the cause of geomagnetic storms // J. Geophys. Res. — 1974. — 79, N 7. — P. 1105–1117.

Надійшла до редакції 17.12.10

Yu. P. Sumaruk

DEPENDENCE OF GEOMAGNETIC FIELD VARIATIONS ON THE INITIAL STATE OF THE MAGNETOSPHERE-IONOSPHERE SYSTEM

The dependence of the geomagnetic field variations during a great magnetic storm on the initial state of the magnetosphere-ionosphere system is investigated. It is shown that intensity of auroral electrojet is controlled by integral wind parameters for several hours. The sensitivity of the magnetosphere-ionosphere system to changes of the solar wind parameters increases with the enhancement of ionosphere disturbance. The greater is the initial level of the ionosphere disturbance, the greater is the amplitude of the following variations at the same changes of interplanetary medium parameters.