

УДК 523.62

В. М. Решетник, М. І. Дзюбенко, В. М. Івченко

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
03022 Київ, пр. Глушкова, 6

Морфологія геліосферного магнітного поля і авроральний енергопотік

Проаналізовано варіації потоку енергії у північну та південну авроральні зони у зв'язку зі змінами конфігурації геліосферного магнітного поля в околицях Землі. Охоплено період спостережень 1978—2001 рр. Показано, що авроральні потоки збільшуються не лише при південному спрямуванні вектора індукції $B_z < 0$ та при $B_y < 0$, але і при збільшенні повного вектора міжпланетного магнітного поля. При цьому спостерігається систематична асиметрія вторгнень — потік у південну авроральну зону менший за потік у північну. Спостерігається також сезонна варіація інтенсивності авроральних вторгнень — загальна авроральна активність максимальна у періоди рівнодень і мінімальна у періоди сонцестоянь.

МОРФОЛОГИЯ ГЕЛИОСФЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И АВРОРАЛЬНЫЙ ЭНЕРГОПОТОК, Решетник В. Н., Дзюбенко Н. И., Ивченко В. Н. — Проанализированы вариации потока энергии в северный и южный авроральные овалы в связи с изменениями конфигурации гелиосферного магнитного поля вблизи Земли. Охвачено период наблюдений 1978—2001 гг. Показано, что авроральные потоки увеличиваются не только при южном направлении вектора индукции $B_z < 0$ и при $B_y < 0$, но и при увеличении полного вектора межпланетного магнитного поля. При этом наблюдается систематическая асимметрия высыпаний — поток в южную авроральную зону меньше, чем в северную. Наблюдается также сезонная вариация интенсивности авроральных высыпаний — общая авроральная активность максимальна в периоды равноденствий и минимальна в периоды солнцестояний.

MORPHOLOGY OF GELIOSPHERIC MAGNETIC FIELD AND POLAR FLUX, by Reshetnyk V. M., Dzubenko M. I., Ivchenko V. M. — Variations of polar flux in northern and southern ovals are analyzed in connection with changes of the heliospheric magnetic field near the Earth. The period from 1978 to 2001 is covered. It is shown that polar flux grows not only when magnetic field has $B_z < 0$ and $B_y < 0$, but also with increase of interplanetary magnetic field magnitude. We obtained regular asymmetry of precipitation, namely, a flux in the southern hemisphere is less than in the northern hemisphere. Besides, the seasonal variation of auroral precipitation intensity is observed, namely, aurora activity is maximal during equinoxes and minimal during solstices.

ВСТУП

Магнітосфера досить чутлива до зміни параметрів міжпланетного простору. Численні дослідження показали залежність магнітосферної конвекції, струмових систем, магнітних бур, висипання частинок від міжпланетного магнітного поля (ММП).

Полярні сьйва є характерним явищем земної магнітосфери і відслідковують її зміни. Варіації полярних сьйв при змінах орієнтації ММП були помічені досить давно [3, 8]. Ці дослідження показали залежність появи авроральних дуг від складової B_z ММП. Водночас за допомогою УФ-зображень полярної зони, отриманих з космосу, було встановлено, що розташування дуг є чутливим також до знаку B_y ММП [5, 6, 11]. Наземні спостереження теж підтвердили чутливість полярних сьйв до зміни знаку B_y [12, 14]. Була знайдена залежність поведінки всього аврорального овалу від орієнтації міжпланетного поля [4, 5]. Деякі дослідники помітили залежність авроральних явищ від B_x -складової ММП [5]. Встановлені також сезонні варіації полярних сьйв [9, 17].

Однак до цього часу переважно вивчалась залежність полярних сьйв від міжпланетного поля без врахування сезону року, або лише як функція B_z -складової міжпланетного поля. Слід відзначити також, що більшість робіт стосуються разових подій або окремого конкретного явища в авроральному овалі [4, 16]. Тому детальніше дослідження поведінки аврорального овалу залежно від азимутальної орієнтації ММП на великому спостережному матеріалі залишається актуальним і саме цьому присвячена наша робота.

ДАНІ СПОСТЕРЕЖЕНЬ І ОБРОБКА

У нашій роботі використано інформацію про стан міжпланетного поля поблизу Землі, приведену в базі даних OMNI (<http://dbserv.npi.msu.su/data/release2/omnionline.html>) з 1978 по 2001 рр. Компоненти ММП обчислювались зі спостережень КА IMP8 та ISEE3 і представлені в системі GSM. Вісь X спрямована вздовж лінії Земля—Сонце, вісь Z лежить у площині осі X та осі магнітного диполя Землі, вісь Y утворює праву трійку координатних векторів і лежить у площині, близькій до площини екліптики. Використовувались щогодинні дані стану сонячного вітру. Інтервал приблизно 1 год відповідає характерному часу реакції магнітосфери на зміни сонячного вітру на орбіті Землі; це так званий час затримки [10, 13, 15].

Деякий параметр p , поведінка якого в залежності від ММП нас цікавить, ставився у відповідність азимутальному куту повороту вектора ММП φ на момент спостереження параметра p . Далі усереднювались наявні значення p для кожного 10-градусного сектора, на які розбивався повний набір напрямів φ . Результат представлявся на полярній діаграмі. Азимутальний кут φ відраховувався від напрямку на Сонце проти годинникової стрілки в площині XU (вид з півночі). Нуль-пункт амплітуди параметра p зміщений для виділення варіацій вибраного параметра. Довірчий інтервал, вказаний на графіках, складає $\pm\sigma$.

На рис. 1 продемонстровано тенденцію вектора індукції B_{xy} міжпланетного магнітного поля до групування у двох напрямках (з азимутальними кутами $\varphi \approx 135^\circ$ та $\varphi \approx 315^\circ$), тобто до збереження в середньому спіральної структури. Просторовий розподіл напрямків ММП представлено на рис. 2, де θ — кут відхилення від площини XU , додатний у північну сторону. Можна помітити, що вектори індукції міжпланетного поля групуються у двох переважних напрямках. Подібний результат був отриманий Веселовським [1] при аналізі справедливості теорії Паркера.

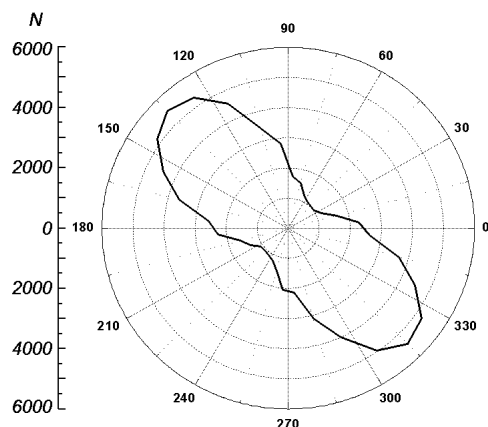


Рис. 1. Розподіл кількості N використаних вимірів B_{xy} ММП по напрямках φ за період 1978—2001 рр.

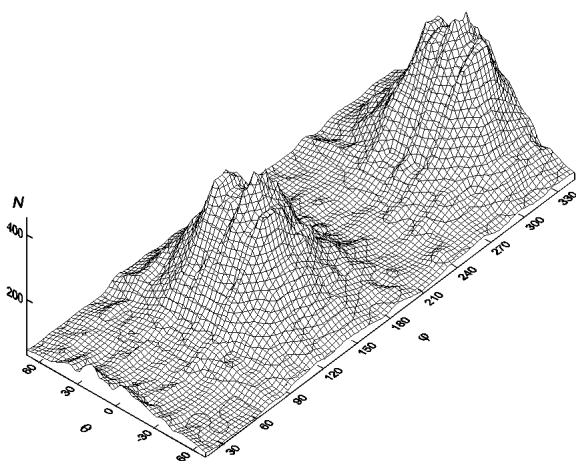


Рис. 2. Просторовий розподіл кількості спостережень ММП за період 1978—2001 рр.

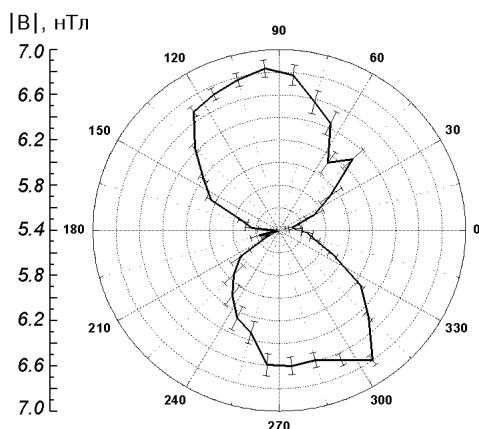


Рис. 3. Розподіл середньої індукції B_{xy} ММП по напрямках φ за період 1978—2001 рр.

На рис. 3 наведено зв'язок модуля середньої індукції ММП і його напрямку у просторі. Тут добре помітно асиметрію: коли вектор магнітного поля лежить близько до напрямку Земля—Сонце, то напруженість є мінімальною, а коли вектор ММП перпендикулярний до напрямку Сонце—Земля він досягає максимальних значень. Ці дані узгоджуються з більш ранніми дослідженнями [7], де було також отримано асиметрію значень напруженості ММП для чотирьох напрямків: Сонце, анти-Сонце і перпендикулярно до напрямку Сонце—Земля. Такий ефект, ймовірно, викликаний стисненнями сонячного вітру, пов'язаними з високошвидкісними потоками, в яких магнітне поле частіше має напрямок, нормальний до сонячного радіуса [2].

Рис. 4. Середня індукція ММП в залежності від кута θ нахилу до площини екліптики за період 1978—2001 рр.

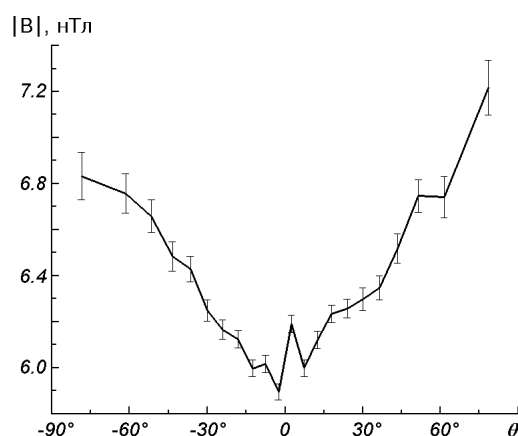
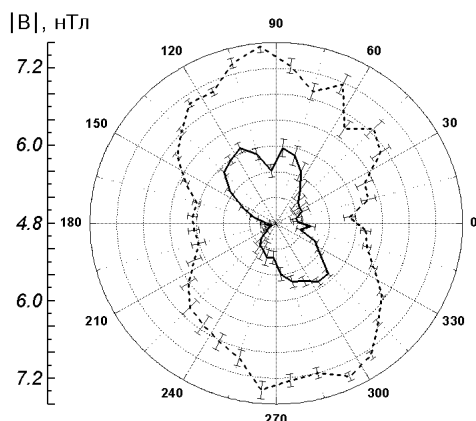


Рис. 5. Залежність індукції ММП від його азимутального напрямку φ для періоду низької (пунктирна крива) і високої (суцільна крива) сонячної активності



Цю думку підтверджує рис. 4, який показує залежність середньої напруженості ММП від кута між вектором магнітного поля та площиною XU .

На рис. 5 наведена залежність середньої індукції ММП від азимутального кута φ для високої та низької сонячної активності, за проаналізований період, який, нагадаємо, складає більше двадцяти років.

Активність полярних сьвів пов'язана з енергетичним потоком частинок, які висипаються в межах аврорального овалу (PF). Цей потік пропорційний оптичній яскравості овалу на УФ-зображеннях і визначається на основі спостережень полярних супутників NOAA (<http://sec.noaa.gov/ftpdir/lists/hpi/>). Найвні дані для північного та південного овалів надають унікальну можливість порівняння процесів у різних півкулях. Спостереження подаються з інтервалом в одну-дві години, в залежності від моменту проходження супутника над овалом. Використовувались результати вимірювань за період з 1978 по 2001 рр., випали з цього ряду лише 1989 р. та 1990 р., коли спостережень не було.

Відомості про міжпланетне магнітне поле подаються на початок кожної години, тоді як спостереження потоку енергії на момент проходження супутника. Тому для зіставлення двох рядів спостережень використовувалась лінійна інтерполяція авроральних даних на початок кожної години, за умови, що найближчий вимір полярного енергопотіку віддалений у часі не більше ніж на півгодини. Таким чином були отримані четвірки даних на певний момент часу: три компоненти ММП та інтерпольований полярний енергопотік. Загальна кількість таких реєстрів налічує 65 тисяч для кожної

півкулі. Далі для кожного реєстру визначались значення $\varphi = \arctg(B_y/B_x)$, $\theta = \arctg(B_z/\sqrt{B_x^2 + B_y^2})$, $|\mathbf{B}| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$. Здійснювалась також сепарація даних в залежності від напрямку та значень вектора міжпланетного поля, а саме: південна чи північна орієнтація, мала чи велика напруженість.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Вказаними вище методами ми отримали залежність між напрямком ММП і енергопоток в зону аврорального овалу. Рис. 6, *а* містить усереднені значення потоку для північної полярної шапки, рис. 6, *б* — для південної. Видно, що авроральна активність у північній півкулі є в цілому вищою, ніж у південній, але загальна форма залежності є подібною в обох півкулях. Добре помітна азимутальна асиметрія наведених графіків. Якщо ці дані порівняти з розподілами напруженості ММП, наведеними на рис. 3, то можна стверджувати, що величина напруженості геліосферного магнітного поля в основному визначає поведінку аврорального овалу. Відомо, що південне спрямування ММП значно посилює активність овалу, на що вказували багато дослідників. Подібна закономірність також була отримана на нашому матеріалі.

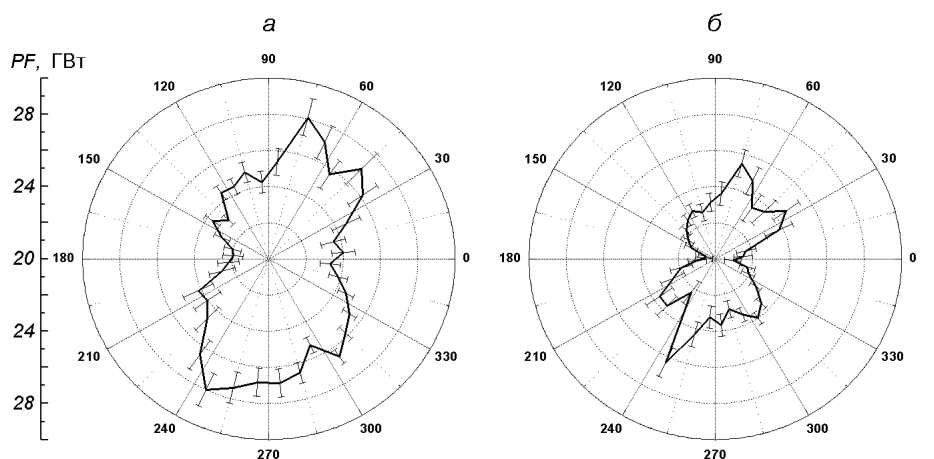


Рис. 6. Енергопотік в північний (*а*) та південний (*б*) овали як функція азимутального напрямку ММП

Далі ми провели аналіз для трьох різних діапазонів індукції магнітного поля: $|\mathbf{B}| < 5$ нТл, 5 нТл $< |\mathbf{B}| < 8$ нТл і $|\mathbf{B}| > 8$ нТл. Такий поділ дав три приблизно однакових масиви для подальшої обробки. Авроральний енергопотік для слабкого ММП наведено на рис. 7, *а*, *б* окремо для південної та північної півкуль. Помітно, що активність авроральних явищ є мінімальною для другого квадранта, а максимальною — при сильних збуреннях середньої спіральної структури, коли φ відповідає першому та третьому квадрантам. Якщо порівнювати ситуації для магнітних полів, близьких до середніх спіральних, то коли $B_y > 0$ (другий квадрант, $\varphi \approx 135^\circ$) авроральний енергопотік є меншим, ніж коли $B_y < 0$ (четвертий квадрант, $\varphi \approx 315^\circ$). Подібний висновок був також отриманий в роботі [17] для північної півкулі на базі аналізу яскравості аврорального овалу в УФ-діапазоні.

Слід також відмітити, що форма поведінки енергопотіку для різних

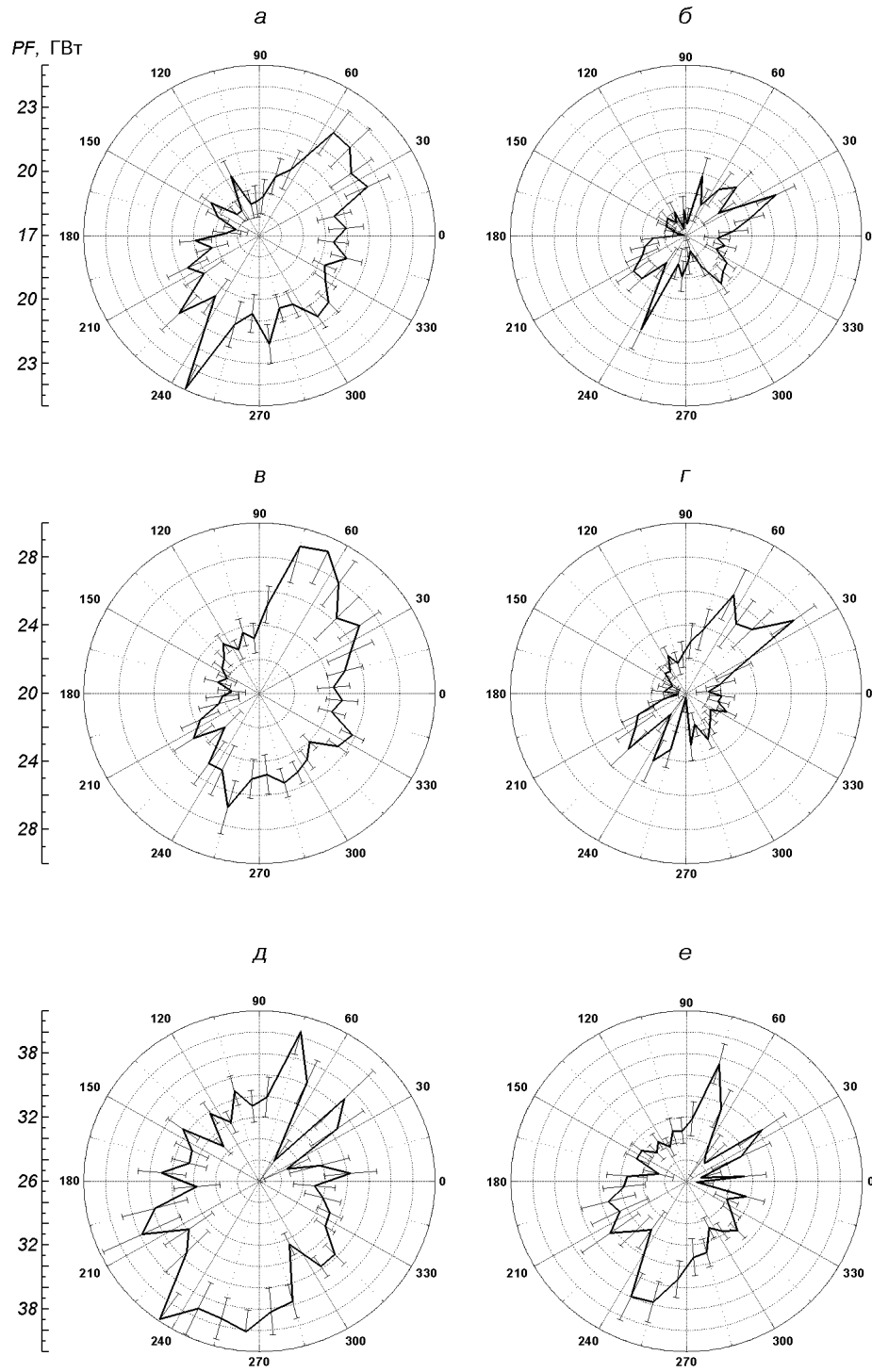


Рис. 7. Енергопотік в північний (*a*) та південний (*б*) овали для індукції ММП $|B| < 5$ нТл, північний (*в*) та південний (*г*) овали для індукції ММП $5 \text{ нТл} < |B| < 8$ нТл, північний (*д*) та південний (*е*) овали для індукції ММП $|B| > 8$ нТл

напрямків ММП однакова в обох півкулях. Аналогічні результати були отримані для середнього значення індукції міжпланетного поля (рис. 7, *в*, *г*), але в цьому випадку загальний енергопотік вищий. Для сильного ММП авроральний енергопотік значно вищий, ніж для помірних полів. При цьому асиметрія, пов'язана з напрямком вектора магнітного поля, менш помітна (рис. 7, *д*, *е*). Отже, при сильних геліосферних міжпланетних полях потік в авроральний овал більший, і менше залежить від азимутального напрямку ММП. Південне спрямування вектора ММП також збільшує енергопотік і дещо нівелює асиметрію, яка спостерігається для $B_z > 0$.

Активність авроральних явищ залежить від пори року; так, в роботі [9] показано, що нічні дискретні полярні сяйва частіше з'являються навесні, ніж восени, а яскравість сяйв на денній стороні овалу є вищою влітку, ніж навесні. Загалом можна запропонувати два механізми впливу сезону на авроральну зону: зміни параметрів іоносфери, пов'язані з сезонними варіаціями, та зміна напрямку земного магнітного диполя по відношенню до лінії Земля—Сонце. Для подальшого аналізу ми розбили весь масив спостережених даних на чотири підмасиви (за сезонами), по три місяці кожний, з центрами на днях весняного та осіннього рівнодень і літнього та зимового сонцестоянь. На рис. 8, *а* приведено загальний енергопотік в північний авроральний овал для зимового та літнього сонцестоянь. Для літа спостерігається явна асиметрія, інтенсивність авроральних явищ мінімальна в другому квадранті діаграми ($B_y > 0$), а максимальна для четвертого квадранта, де $B_y < 0$. Для зими асиметрія є протилежною до літньої, а саме: в четвертому квадранті, де $B_y < 0$, авроральна активність є мінімальною. На рис. 8, *б* наведені аналогічні діаграми для весняного та осіннього рівнодень. Для осені активність вища, коли ММП спрямоване від Сонця, тобто коли $B_y > 0$, тоді як весною активність більша ($B_y < 0$). Для авроральних явищ південної півкулі також спостерігається асиметрія. Але слід зауважити, що активність і сезонна асиметрія для південної півкулі менша, ніж для північної півкулі (рис. 9).

Вектор дипольного моменту Землі влітку спрямований від Сонця, і тому Perez'єднання антипаралельних магнітних ліній інтенсивніше у високих широтах північної півкулі. Тобто, влітку магнітосфера чутливіша до стану ММП [17], і ступінь асиметрії є вищим, ніж узимку. Взимку інтенсивне Perez'єднання відбувається у південній півкулі, оскільки вектор магнітного

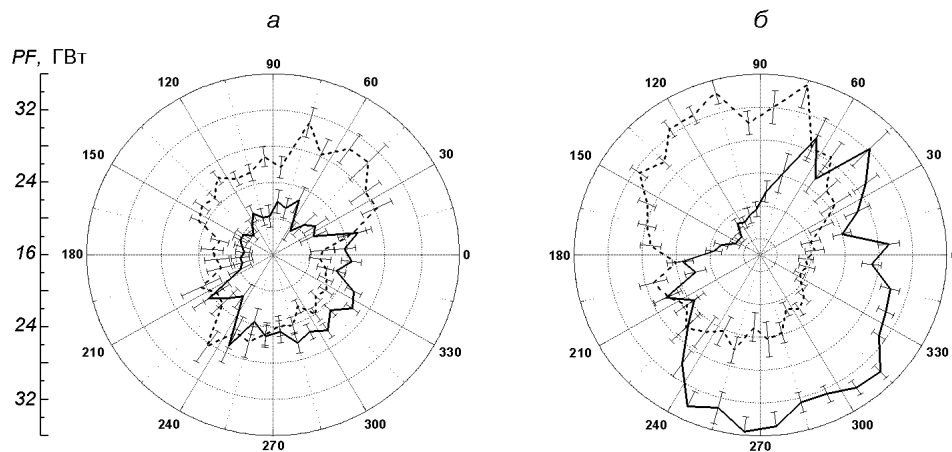
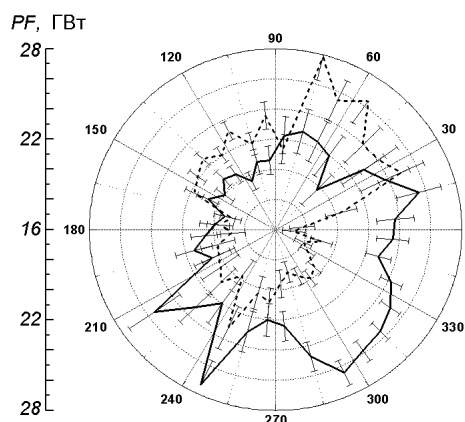


Рис. 8. Енергопотік в північний (а) та південний (б) овал для зимового (пунктирна лінія) та літнього (суцільна лінія) сонцестоянь в залежності від азимутального напрямку ММП

Рис. 9. Енергопотік в південний овал для зимового (пунктирна лінія) та літнього (суцільна лінія) сонцестоянь в залежності від азимутального напрямку ММП



моменту Землі спрямований до Сонця. Рис. 9 демонструє поведінку енергопотіку в південній півкулі за зимовий та літній періоди. Видно, що взимку південний авроральний овал чутливіший до напрямку ММП, ніж влітку, тобто поведінка протилежна північному овалу. Це підтверджує висловлене вище припущення.

ВИСНОВКИ

1. Отримано просторовий розподіл вектора ММП за даними бази OMNI, період 1978—2001 рр. Підтверджена спіральна орієнтація міжпланетного магнітного поля. Встановлено, що величина ММП мінімальна, коли вектор індукції міжпланетного поля лежить у площині екліптики та вздовж напрямку Сонце—Земля.

2. Проведено статистичне дослідження варіацій аврорального енергопотіку в залежності від напрямку ММП. Встановлено, що середня авроральна активність для обох півкуль вища, коли $B_y < 0$.

3. Потік енергії в авроральну область залежить також від величини напруженості міжпланетного поля; з її збільшенням активність авроральних явищ помітно збільшується. Південне спрямування ММП також значно підсилює енергопотік. Південна півкуля менш активна, ніж північна, але вказані тенденції характерні і для неї.

4. Активність авроральних явищ залежить не лише від напрямку та величини ММП, але і від пори року. Загальна активність мінімальна у періоди сонцестоянь і максимальна — в періоди рівнодень. Для північної півкулі авроральна активність досягає мінімуму в період літнього сонцестояння, тоді як для південної півкулі — в період зимового.

1. Веселовский И. С., Тарсина М. В. Угловое распределение вектора межпланетного магнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия.—2001.—41, № 4.—С. 471—476.
2. Коваленко В. А. Солнечный ветер. — М.: Наука, 1983.—272 с.
3. Carlson H. C. Dynamics of the quiet polar cap // J. Geomagn. Geoelectricity.—1990.—42.—Р. 697—708.
4. Cummock J. A., Sharber J. R., Heelis R. A., et al. Evolution of the global aurora during positive IMF B_z and varying IMF B_y conditions. // J. Geophys. Res.—1997.—102, N A8.—Р. 17489—17497.
5. Elphinstone, R. D., Jankowska K., Murphree J. S., Cogger L. L. The configuration of the auroral distribution for interplanetary magnetic field B_z northward. I IMF B_x and B_y dependencies as observed by the Viking satellite // J. Geophys. Res.—1990.—95, N 5.—Р. 5791—5804.

6. *Gussenhoven M.* Extremely high latitude auroras // *J. Geophys. Res.*—1982.—**87**, N 4.—P. 2401—2412.
7. *King J. H.* A survey of long-term interplanetary magnetic field variations // *J. Geophys. Res.*—1976.—**81**, N 2.—P. 653—660.
8. *Lassen K., Danielsen C.* Quiet time pattern of auroral arcs for different directions of the interplanetary magnetic field in the Y-Z plane // *J. Geophys. Res.*—1978.—**83**, N 11.—P. 5277—5284.
9. *Liou K., Newell P. T., Meng C.-I., et al.* Synoptic auroral distribution: A survey using Polar ultraviolet imagery // *J. Geophys. Res.*—1997.—**102**, N A12.—P. 27197—27205.
10. *Liou K., Newell P. T., Meng C.-I., et al.* Characteristics of the solar wind controlled auroral emissions // *J. Geophys. Res.*—1998.—**103**, N 8.—P. 17543—17558.
11. *Makita, K., Meng C.-I., Akasofu S.-I.* Transpolar aurora, their particle precipitation, and IMF By component // *J. Geophys. Res.*—1991.—**96**, N 8.—P. 14085—14095.
12. *McWilliams K. A., Milan S. E., Yeoman T. K., et al.* Interplanetary magnetic field By dependence of the relative position of the dayside ultraviolet auroral oval and the HF radar cusp // *J. Geophys. Res.*—2001.—**106**, N A12.—P. 29027—29036.
13. *Meng C.-I., Tsurutani B., Kawasaki K., Akasofu S.-I.* Cross-correlation analysis of the AE-index and the interplanetary magnetic field Bz-component // *J. Geophys. Res.*—1973.—**78**, N 4.—P. 617—629.
14. *Moen J., Carlson H. C., Sandholt P. E.* Continuous observation of cusp auroral dynamics in response to an IMF By polarity change // *Geophys. Res. Lett.*—1999.—**26**, N 9.—P. 1243—1246.
15. *Rodriguez J. V., Valladares C. E., Fukui K., Gallagher H. A.* Antisunward decay of polar cap arcs // *J. Geophys. Res.*—1997.—**102**, N A12.—P. 27227—27247.
16. *Sandholt P. E., Farrugia C. J.* On the dynamic cusp aurora and IMF By // *J. Geophys. Res.*—1999.—**104**, N A6.—P. 12461—12472.
17. *Shue J.-H., Newell P. T., Liou K., Meng C.-I.* Influence of interplanetary magnetic field on global auroral patterns // *J. Geophys. Res.*—2001.—**106**, N A4.—P. 5913—5926.

Надійшла до редакції 06.06.03