

УДК 521.937

PACS number(s): 96-60-FS

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ СОНЯЧНОГО КОРПУСКУЛЯРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ПОБЛИЗУ ЗЕМЛІ

М. Ковальчук¹, М. Стоділка¹, М. Гіряк¹, В. Кошовий²,
О. Івантишин², А. Лозинський²

¹Астрономічна обсерваторія Львівського національного
університету імені Івана Франка

бул. Кирила і Мефодія, 8, 79005 Львів, Україна
e-mail: sun@astro.franko.lviv.ua

²Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України

Для дослідження стійкості структури корпускулярного випромінювання Сонця на різних фазах 23-го циклу активності зіставлялись щоденні геомагнітні характеристики – рекурентні магнітні бурі та збурення із щоденними даними про потоки корпускулярних частинок (протонів і електронів). Використовувались каталоги геофізичних та сонячних індексів за період 1996–2007 рр.

Були визначені значення коефіцієнтів кореляції між 27-денними рядами геомагнітних характеристик і оцінено статистичну значимість отриманих результатів. Усі коефіцієнти кореляції за абсолютною величиною перевищували 0,50, а величина похибок становила менше $\pm 0,14$, що дає можливість, відповідно до правил для оцінки значимості, вважати результати достовірними. Найвищі коефіцієнти кореляції (0,87–0,90) отримані в епохи спаду і мінімуму сонячної активності, що свідчить, згідно із сучасними представленнями, про збереження стійкості структури сонячних корпускулярних потоків.

Рівночасно ми простежили зв'язок варіацій геомагнітної активності зі зміною площі корональних дір, які є основним джерелом сонячних корпускулярних потоків. Визначено, що площі корональних дір досягають найбільшого значення в епоху спаду сонячної активності, чим можна пояснити високу геомагнітну активність у цей же період циклу.

Ключові слова: цикл сонячної активності, магнітні бурі, корпускулярне випромінювання, корональні діри.

Вивчення корпускулярного поля Сонця набуває дедалі важливішого значення як для з'ясування природи процесів на Сонці, так і для розв'язання низки практичних задач з проблеми сонячно-земних зв'язків. Серед численних процесів на Землі, які зазнають

впливу Сонця, особливо виділяються процеси в іоносфері та магнітосфері, зумовлені прямим впливом сонячного геоэффективного випромінювання. Під останнім розуміють ультрафіолетове та рентгенівське випромінювання, корпускулярні потоки, які утворюють сонячний вітер з його магнітним полем, ударними хвилями та іншими збуреннями, а також сонячні космічні промені.

Тісний зв'язок між випромінюванням Сонця та багатьма явищами на Землі зумовило використання спостережень потоків корпускулярного випромінювання під час розв'язку задач сонячно-земної фізики. Земна магнітосфера є своєрідним приладом, який реєструє структуру поля сонячних корпускулярних потоків. Вивчення варіацій геомагнітного поля, спричинених дією фактора сонячної активності, може сприяти при дослідженні впливу Сонця на земні процеси, при діагностиці та прогнозі геофізичних явищ. Проте досі залишається невирішеним питання про фізичний механізм такого впливу, немає бази для виявлення такого механізму шляхом проведення різних експериментів або шляхом статистичного аналізу даних. Складність передання збурень від Сонця до нижньої атмосфери Землі та наявність одночасного впливу на її атмосферу інших, зокрема, антропогенних факторів, призводить до того, що зовнішній сигнал важко виявити на фоні власних потужних циркуляційних механізмів у системі земної атмосфери. Більше того, результати аналізу спостережуваних даних часто суперечливі [1]. При досить строгому підході виявляється, що низка результатів, отриманих раніше, взагалі недостатньо обґрунтована і не є статистично значима. Тому окрему увагу приділяють методичним питанням, зокрема питанням правильного використання методів статистичного аналізу даних і, безумовно, визначенню статистичної значимості результатів, знаходженню та вивченню статистичних закономірностей. Застосування удосконалених статистичних методів (спектрального аналізу, методу головних компонент та вейвлет-аналізу тощо) до комплексного вивчення часових рядів даних про геофізичні збурення та про геліофізичні активні процеси спричинило істотне підвищення достовірності та кількісної оцінки значимості отриманих результатів, до зменшення фактора суб'єктивності висновків.

Оскільки вплив сонячної активності на земні процеси є складним і різнобічним, ситуація з поясненням цього впливу ускладнюється, адже замість використання звичайних індексів сонячної активності (кількість сонячних плям, потоки радіо- та рентгенівського випромінювання тощо), які мають 11-річну періодичність, необхідно звернутись до більш екзотичних показників, зокрема до таких, як корпускулярне випромінювання Сонця та площі корональних дір. Потоки сонячних частинок містять в собі інформацію, яка характеризує ступінь активності Сонця. Тому на основі даних про геомагнітні збурення ми спробували розв'язати задачу про стійкість структури корпускулярного випромінювання Сонця поблизу земної поверхні та встановити особливості у зміні структури сонячного корпускулярного випромінювання залежно від фази сонячного циклу. Такі дослідження мають прогностичний характер в контексті глобальних змін, їх можна використати для практичних і народногосподарських потреб, оскільки сонячна активність є чутливим індикатором багатьох порушень процесів на Землі і в навколосемному просторі.

Для реалізації поставленого завдання ми використали значення щоденних спостережень корпускулярного випромінювання Сонця – потоки протонів і електронів у 23-му циклі сонячної активності (1996–2007 рр.), одержаних на геостаціонарах GOES-8, GOES-9, GOES-11 і GOES-12 з бази даних в Інтернеті [2], площі корональних дір за цей же період [3], і зіставили їх із синхронними даними середньодобових планетарних геомагнітних індексів, які фіксуються в Центрі космічної погоди [4].

Методи статистичного аналізу обирали залежно від особливостей даних і відповідно до мети аналізу. Ми скористалися методом кореляційного аналізу часових рядів про корпускулярне випромінювання Сонця – електронів (рис. 1), протонів (рис. 2) і синхронних даних про геофізичні збурення магнітного поля Землі (рис. 3).

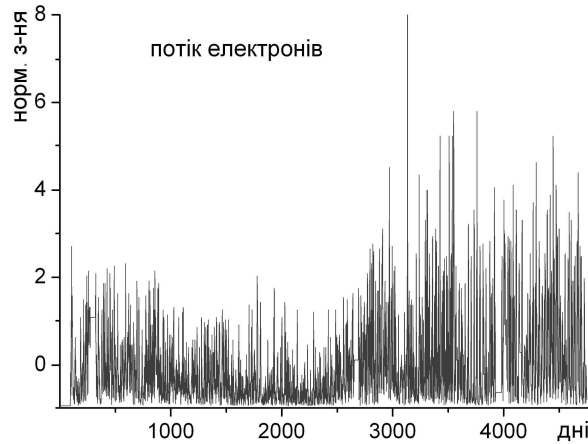


Рис. 1. Корпускулярне випромінювання Сонця у 23-му циклі: потоки електронів

Проте, звичайний кореляційний метод не виправдовує себе при одночасному дослідженні декількох процесів, оскільки може відбутися замивання взаємодії кореляції. Тому ми звернулись до теорії Тьюкі [5], яка звільнила кореляційний аналіз від цих труднощів. Цю теорію успішно застосовували у розв'язанні геофізичних задач [6], при дослідженні сонячної грануляційної сітки [7], при аналізі спостережуваних даних про потоки випромінювання в різних областях сонячного спектра [8]. Статистична обробка виконувалась за алгоритмами обчислення когерентних і спектральних функцій, наведених у [9]. Внаслідок цього ми отримали повну інформацію про стійкість структури корпускулярного випромінювання Сонця поблизу земної поверхні з обмеженого об'єму спостережуваного матеріалу. Було з'ясовано, що використовувані нами спостережувані дані є найбільш змістовними і максимально висвітлюють поставлені завдання про стійкість і особливості в зміні структури сонячного корпускулярного випромінювання.

З метою отримання кількісних оцінок зв'язку вказаних геліогеопараметрів ми розраховували взаємні кореляційні функції між кожною парою вхідних параметрів, множинну кореляційну функцію між трьома параметрами (додатковими параметрами були площі корональних дір за ті самі проміжки часу), і провели аналіз для виявлення кореляційних залежностей. Усі вхідні параметри були центровані і нормовані на середньоквадратичне відхилення.

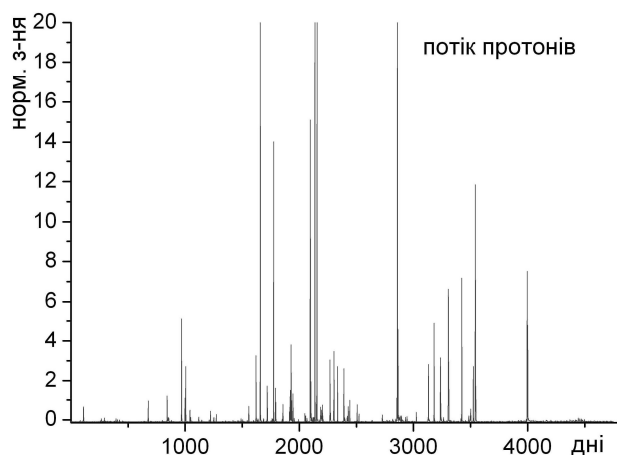


Рис. 2. Корпускулярне випромінювання Сонця у 23-му циклі: потоки протонів

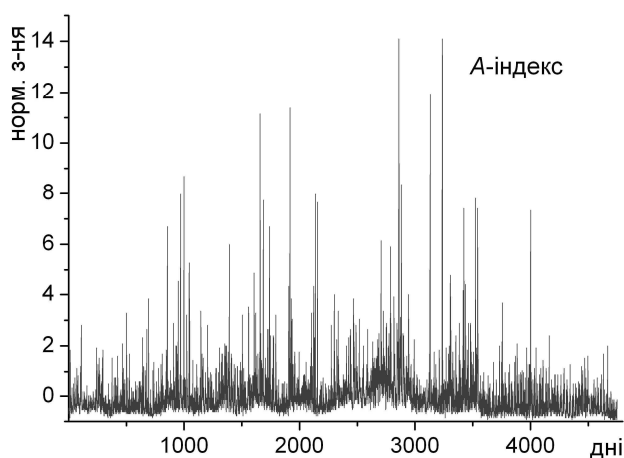


Рис. 3. Геофізичні збурення магнітного поля Землі

Спрощений метод безпосереднього корелювання щодобових даних про корпускулярні потоки з такими ж значеннями геомагнітних збурень звичайно не дають змоги виявити кореляційного зв'язку. Коефіцієнти кореляції між обома часовими рядами, зазвичай, є дуже низькими; і тільки у разі використання середніх значень за досить великий часовий інтервал (наприклад, за декілька місяців) проявляється зв'язок між геліо- і геофізичними явищами. Варто зазначити, що для встановлення такого зв'язку необхідно мати матеріал спостережень, який охоплює проміжок часу порядку не менше від одного циклу сонячної активності (понад 11 років).

У нашому розпорядженні були дані про 312 магнітних бур і про 536 геомагнітних збурень. Геомагнітна активність за цей період вирізнялася досить високою рекурентністю, тобто повторюваністю бур і збурень через середній синодичний оберт Сонця (27 діб).

Рекурентними виявились 72% (225) бур і 65% (387) збурень. Кратність повторень цих бур і збурень подана в табл. 1.

Таблиця 1

Повторюваність геомагнітних подій в 23-му циклі сонячної активності

Геомагнітна активність	Кратність повторювань							
	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Бурі	41	29	6	3	2	-	-	-
Збурення	45	36	12	9	7	4	2	2

Далі, користуючись методом, розробленим І.Д. Зосимович [10], про кореляційну залежність між 27-денними рядами геомагнітних індексів, була оцінена статистична значимість отриманих результатів. Для цього розраховувались емпіричні імовірності \hat{P}_k подій (бур та збурень), які повторюються в декількох послідовних 27-денних періодах:

$$\hat{P}_k = \frac{n_k}{n} \quad (k = 2, 3, 4, \dots), \text{ де } n_k - \text{число } k - \text{кратних послідовностей геомагнітних бур і}$$

збурень, n – загальне число послідовностей, які включають і однократні (n_1) події, тобто ці, що не повторювались.

Для зіставлення розраховувались відповідні теоретичні імовірності P_t , роблячи припущення про випадковий розподіл тих самих подій:

$$P_t = \frac{t}{T},$$

де t – число діб, протягом яких спостерігались геомагнітні події, T – загальне число діб у досліджуваному інтервалі часу (12 років).

Дані про зіставлення емпіричних і теоретичних імовірностей виникнення геомагнітних подій, подані в табл. 2.

Таблиця 2

Емпірична \hat{P}_k і теоретична P_t імовірність виникнення рекурентних геомагнітних подій (бур і збурень)

Імовірність	Кратність повторень							
	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
P_e	0,141	0,112	0,029	0,021	0,015	0,006	0,003	0,003
P_t	0,019	0,015	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$9,1 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$

Із табл. 2 видно, що емпірична імовірність виникнення повторюваності геомагнітних бур та збурень значно перевищує імовірність випадкових повторень. Це перевищення зростає зі збільшенням кратності повторень. Отже, рекурентність бур і збурень є статистично значимою і не є наслідком випадкових збігів. Отже, сонячні корпускулярні потоки, які спричиняють рекурентні геомагнітні збурення, зберігають свою структуру тривалий час – 8–9 місяців. У табл. 3 і на рис. 4 подано залежність розподілу рекурентних бур і збурень від фази циклу сонячної активності.

Таблиця 3

Залежність розподілу рекурентних бур і збурень від фази сонячного циклу

Фаза	M	N	$N / M, \%$
0	45	20	44
0,1	73	8	11
0,2	93	44	47
0,3	126	86	68
0,4	188	139	74
0,5	174	146	84
0,6	119	98	82
0,7	62	38	61
0,8	34	19	53
0,9	37	18	48

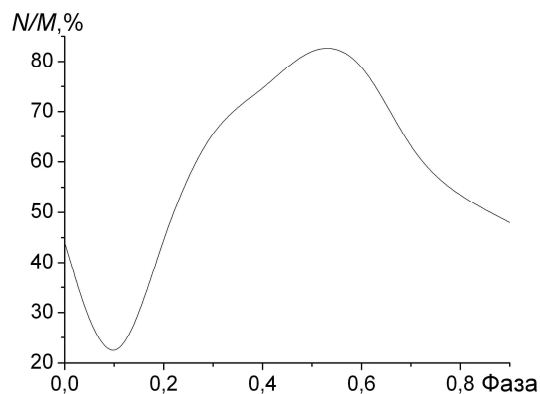


Рис. 4. Процентне відношення рекурентних бур і збурень до їх загального числа в різних фазах сонячного циклу

Як бачимо на рис. 4 рекурентність геомагнітної активності монотонно зростає від мінімуму (фаза 0,0–0,2) до максимуму (фаза 0,4–0,6) і залишається високою на гілці спаду сонячної активності (фаза 0,6–0,9). Це узгоджується з даними, які отримав М.М. Гневишев [11]. Належить підкреслити, що висока геомагнітна активність на гілці спаду сонячного циклу змусила нас вивчати зв'язок геофізичних збурень із такими утвореннями корпускулярної діяльності Сонця, як корональні діри. Корональні діри, що

спостерігаються в лінії He I $\lambda 1083$ нм – це утворення на поверхні Сонця, які за яскравістю перевищують на 2–4% незбурений диск; у них знижений контраст – хромосферна сітка в корональних дірах замита [12]. У 70-х роках минулого століття був запропонований вигідний індекс корпускулярної активності – сумарна площа корональних дір у відсотках від площі сонячного диска. На рис. 5 зображено зміну площі корональних дір із фазою сонячного циклу.

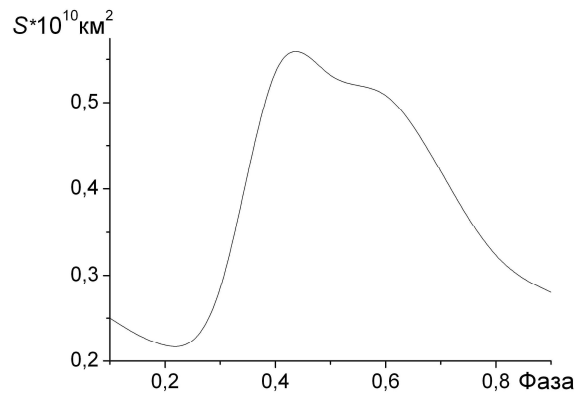


Рис. 5. Зміна площі корональних дір з фазою сонячного циклу

Як видно з рис. 5, площі корональних дір досягають найбільших значень в епоху спаду сонячної активності, подібно до високої геомагнітної активності в той самий період.

Строгий аналіз проведених розрахунків засвідчив, що статистично обґрунтованими і достовірними можна вважати такі висновки:

1. З'ясовано, що із усіх складових сонячного корпускулярного випромінювання найтісніше пов'язані з геомагнітною активністю високошвидкісні сонячні протони; вони досягають Землі через 2–3 доби.
2. Із оцінки статистичної значимості ступеня повторюваності геомагнітних бур і збурень доходимо висновку, що вони зумовлені дією рекурентного корпускулярного потоку, що повторюється через проміжок часу, кратний середньому синодичному оберту Сонця – 27 діб. Емпірична імовірність \hat{P}_k виникнення повторюваності геомагнітних бур і збурень значно перевищує імовірність випадкових повторень P_r . Це перевищення зростає із збільшенням кратності повторень. Цим підтверджується статистична реальність стійкості структури сонячного корпускулярного агента протягом декількох обертів Сонця.
3. Кратність повторень геомагнітних бур виявляє залежність від фази 11-літнього циклу сонячної активності. Характерно, що крива геомагнітних збурень має дві вершини: перша відповідає епосі максимуму 11-літнього циклу (фаза 0,4), друга – початку епохи спаду (фаза 0,6). Саме в такі періоди отримані найвищі коефіцієнти кореляції з корпускулярними потоками (0,76–0,83).
4. Особливості зміни структури сонячного корпускулярного випромінювання переважно виявляються в послабленні кореляційних зв'язків із геомагнітною

активністю в окремі часові періоди циклу сонячної активності. Проте, навіть тоді коефіцієнти кореляції за абсолютною величиною перевищують 0,50, величина похибок становить $\pm 0,14$, що дає змогу відповідно до правил оцінки значимості вважати результати достовірними. Значна кількість рекурентних бур і збурень, що повторюються тривалий час у максимумі та на гілці спаду сонячної активності, свідчить про існування “довгоживучих” корпускулярних потоків у ці періоди, чим підтверджується високий ступінь стійкості їх структури.

5. Водночас ми простежили зв'язок варіацій геомагнітної активності зі зміною площі корональних дір, котрі, як відомо, є головним джерелом сонячних корпускулярних потоків. З'ясовано, що корональні діри досягають максимальних площ в епоху спаду сонячної активності, чим частково можна пояснити високу геомагнітну активність у цей же період циклу.

-
1. *Мак-Кормак Б.* Солнечно-земные связи, погода и климат / Б. Мак-Кормак, Т. Селига, У. Робертс. – М. : Мир, 1982. – 384 с.
 2. National Weather Service Space Weather Prediction Center. Data and Products. Instruments Measurements. SWPC. Historical SWPC Products. SWPS. Historical SWPC Products. SWPS Anonymous FTP Server Historical SWP Products from 1996 // www.swpc.noaa.gov/_DPD.txt
 3. National Weather Service Space Weather Prediction Center. Data and Products. Instruments Measurements. SWPC. Historical SWPC Products. SWPS. Historical SWPC Products. SWPS Anonymous FTP Server Historical SWP Products from 1996 // ftp.swpc.noaa.gov/_DSD.txt
 4. National Weather Service Space Weather Prediction Center. Data and Products. Instruments Measurements. SWPC. Historical SWPC Products. SWPS. Historical SWPC Products. SWPS Anonymous FTP Server Historical SWP Products from 1996 // www.swpc.noaa.gov/_DGD.txt
 5. *Мостеллер Ф.* Анализ данных и регрессия в двух книгах / Ф. Мостеллер, Дж. Тьюки. – М. Финансы и статистика. 1^{-ая} кн. – 1982. – 317 с. / Ф. Мостеллер, Дж. Тьюки. – М. : Финансы и статистика. 2^{-ая} кн. – 1982. – 239 с.
 6. *Munk W.H.* Spectra of low frequency ocean waves / W.H. Munk, F.E. Snodgrass, M.J. Tucker // Bull. Scripps. Inst. Oceanography (Tech. Series). – 1959. – Vol.7, N 4. – P. 283–361.
 7. *Васильева Г.Я.* Фотоэлектрическая фотометрия солнечной грануляции в нескольких областях континуума / Г.Я. Васильева, А.С. Жербина, А. Найденова, И.В. Юдина, А.К. Чандаев // Изв. ГАО. – 1967. – Т. XXIV, № 182. – Вып. 6. – С. 6–61.
 8. *Гірняк М.Б.* Комплексний аналіз спостережуваних даних про потоки випромінювання від хромосферних спалахів в оптичній, рентгенівській та радіообластях сонячного спектру / М.Б. Гірняк, М.М. Ковальчук // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. фіз. – 1999. – Вип. 32. – С. 108–114.
 9. *Дженкинс Г.* Спектральный анализ и его приложения / Г. Дженкинс, В. Ваттс. – М. : Мир, 1971. – Т. 1. – 316 с.
 10. *Дженкинс Г.* Спектральный анализ и его приложения / Г. Дженкинс, В. Ваттс. – М. : Мир, 1972. – Т. 2. – 287 с.

11. Зосимович *И.Д.* Геомагнитная активность и устойчивость корпускулярного поля Солнца / И.Д. Зосимович. М. : Наука, 1981. – 191 с.
12. Гневъшев *М.Н.* 11-летний цикл в радиоизлучении Солнца / М.Н. Гневъшев // *Астрономический журнал*. – 1965. – Т. 42, № 3. – С. 488–493.
13. Степанян *Н.Н.* Связь корональных дыр с окружающими магнитными полями / Н.Н. Степанян, Е.В. Малакушенко // *Изв. КрАО*. – 2001. – Т. 97. – С. 76–80.

PECULIARITIES OF SOLAR CORPUSCULAR RADIATION STRUCTURE NEAR EARTH

**М. Koval'chuk¹, М. Stodilka¹, М. Hirnyak¹, V. Koshovyi²,
O. Ivantyshyn², A. Lozynskyi²**

¹*Astronomical observatory of the Ivan Franko Lviv National University
Kyrylo i Mephodii Str., 8, 79005 Lviv, Ukraine
e-mail: sun@astro.franko.lviv.ua*

²*Karpenko Physical and Mechanical Institute of NASU*

For the study of stableness of corpuscular radiation of Sun on various phases of 23-th activity cycle we compare the everyday geomagnetic characteristics (recurrent magnetic storms) with the everyday data about flows of corpuscular particles (protons and electrons). The catalogues of Geophysics and solar indexes during 1996–2007 years were used .

The values of correlation coefficients between 27-days lines of geomagnetic characteristics were determined and the significance of the results was estimated. All the correlation coefficients on the absolute value are exceeded 0,50, and value of the error is less $\pm 0,14$. This means that the results are reliable. The highest correlation coefficients (0,87–0,9) are received on epochs of decrease and minimum of solar activity. This means the conservation of stableness of structure of the solar corpuscular flows.

At the same time we have studied the connection of geomagnetic activity variations with the change of the areas of coronal holes which are main sources of solar corpuscular flows. It is found that the areas of the coronal holes have the largest values in the epoch of decrease of solar activity. This may explain the high geomagnetic activity in this period of cycle.

Key words: solar activity cycle, corpuscular flows, magnetic storms, coronal holes.

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ СОЛНЕЧНОГО КОРПУСКУЛЯРНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ВБЛИЗИ ЗЕМЛИ**

**М. Ковальчук¹, М. Стодилка¹, М. Гирняк¹, В. Кошовый²,
О. Ивантишин², А. Лозинский²**

¹*Астрономическая обсерватория
Львовского национального университета имени Ивана Франко
ул. Кирилла и Мефодия, 8, 79005 Львов, Украина
e-mail: sun@astro.franko.lviv.ua*

²*Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины*

Для исследования устойчивости структуры корпускулярного излучения Солнца на разных фазах 23-го цикла активности сопоставлялись ежедневные геомагнитные характеристики – рекуррентные магнитные бури и возмущения с ежедневными данными о потоках корпускулярных частиц (протонов и электронов). Использовались каталоги геофизических и солнечных индексов за период 1996–2007 г.г.

Были определены значения коэффициентов корреляции между 27-дневными рядами геомагнитных характеристик и оценена статистическая значимость полученных результатов. Все коэффициенты корреляции по абсолютной величине превышали 0,50, а величина ошибок составляла меньше $\pm 0,14$, что дает возможность, в соответствии с правилами для оценки значимости, считать результаты достоверными. Наиболее высокие коэффициенты корреляции (0,87–0,90) получены в эпохи спада и минимума солнечной активности, что свидетельствует, согласно современным представлениям, о сохранении устойчивости структуры солнечных корпускулярных потоков.

Одновременно мы проследили связь вариаций геомагнитной активности с изменением площадей корональных дыр, являющихся главным источником солнечных корпускулярных потоков. Получено, что площади корональных дыр достигают наибольшего значения в эпоху спада солнечной активности, чем можно объяснить высокую геомагнитную активность в этот же период цикла.

Ключевые слова: цикл солнечной активности, корпускулярное излучение, магнитные бури, корональные дыры.

Стаття надійшла до редколегії 05.11.2009
Прийнята до друку 07.06.2010