

УДК 523.165

Взаємодія галактичних космічних променів з високошвидкісними потоками сонячного вітру

А.І. Ключова

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України

Базуючись на статистичному і порівняльному аналізі даних нейтронних моніторів впродовж 1995–2013 років, в статті розглядається вплив рекурентних та спорадичних високошвидкісних потоків сонячного вітру на інтенсивність галактичних космічних променів біля орбіти Землі. Обидва типи високошвидкісних потоків сонячного вітру модулюють потік галактичних космічних променів і спричиняють Форбуш-ефекти різної природи. Досліджено основні параметри Форбуш-знижень, такі як типова форма профілю зниження, амплітуда, тривалість зниження, час затримки, розмір зони модуляції та ін.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ ПОТОКАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА, Ключова А.И. — Основываясь на статистическом и сравнительном анализе данных нейтронных мониторов за 1995–2013 года, в статье рассматривается влияние рекуррентных и спорадических высокоскоростных потоков солнечного ветра на интенсивность галактических космических лучей вблизи орбиты Земли. Оба типа высокоскоростных потоков солнечного ветра модулируют поток галактических космических лучей и вызывают Форбуш-эффекты различного типа. Исследованы основные параметры Форбуш-понижений, такие как типичная форма профиля понижения, амплитуда, длительность понижения, время задержки, размер зоны модуляции и др.

THE INTERACTION OF THE GALACTIC COSMIC RAYS WITH THE HIGH-SPEED SOLAR WIND STREAMS, by Klyucheva A.I. — Based on statistical and comparative analysis of neutron monitor data from 1995 to 2013 years the influence of recurrent and sporadic high-speed streams of solar wind on the intensity of the galactic cosmic rays near Earth orbit was studied. Both types of high-speed solar wind streams modulate the galactic cosmic rays flux and cause Forbush decreases of different nature. The main parameters of Forbush decreases such as typical shape, magnitude, duration of decrease, delay, size of modulation area etc was studied.

Ключевые слова: Форбуш-эффект; Форбуш-понижение; спорадические и рекуррентные высокоскоростные потоки; солнечный ветер; корональные дыры.

Key words: Forbush-effect; Forbush-decrease; sporadic and recurrent high-speed streams; solar wind; coronal holes.

1. ВСТУП

Розвиток і вдосконалення космічних технологій дало можливість встановити численні фактори впливу сонячної активності на технічні і біологічні системи, у зв'язку з чим актуальною науковою задачею стало вивчення усього комплексу нестационарних зовнішніх факторів, що впливають на Землю, а також прогнозування сонячної активності і магнітних бурь. Унікальним інструментом для вивчення процесів, що відбуваються в геліосфері, є варіації галактичних космічних променів (ГКП), які реагують на динамічні процеси в міжпланетному просторі і є інтегральним результатом сонячних, геліосферних і атмосферних явищ. Велике значення в цьому аспекті мають дослідження Форбуш-ефектів (ФЕ), які дають безпосередню інформацію про збурення у міжпланетному середовищі, так як їх параметри тісно пов'язані з явищами в сонячно-земній фізиці.

Форбуш-ефект — це зміна густини та анізотропії космічних променів у великомасштабних збуреннях сонячного вітру [1]. Існують два основні типи збурень сонячного вітру (СВ): спорадичні і рекурентні [4, 5]. Спорадичні високошвидкісні потоки (ВШП) сонячного вітру зумовлені корональними викидами маси (КВМ, CMEs) та потужними сонячними спалахами (SF). Рекурентні ВШП виникають внаслідок розповсюдження у міжпланетному просторі потоків плазми з корональних дір, які обертаються разом з Сонцем. Обидва типи ВШП модулюють потік ГКП, але механізм цієї модуляції є різним.

Метою даної роботи було дослідження модуляційних ефектів галактичних космічних променів високошвидкісними потоками обох типів впродовж циклу сонячної активності.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Базуючись на статистичному порівняльному аналізі даних п'яти станцій нейтронних моніторів за 1995–2013 рр. в роботі проаналізовано понад 600 Форбуш-ефектів та розподілено їх на дві вибірки, залежно від механізму модуляції галактичних космічних променів.

Перша вибірка являє собою Форбуш-зниження, спричинені потужними сонячними спалахами та корональними викидами маси; друга — Форбуш-ефекти, пов'язані з високошвидкісними потоками від корональних дір.

2.1. Форбуш-ефекти, спричинені спорадичними ВШП СВ

Для дослідження зв'язку Форбуш-ефектів з сонячними спалахами було використано наступні дані з відповідними посиланнями на них: супутникові спостереження рентгенівського випромінювання сонячних спалахів [9], деякі параметри міжпланетного середовища [10], а також добові дані вимірювань інтенсивності нейтронної компоненти галактичних космічних променів на поверхні Землі [11]. Порівнюючи дані різних нейтронних моніторів (рис. 1), можна бачити, що форбуш-зниження після потужних сонячних спалахів реєструються на Землі однієї й тієї ж доби. Характер варіацій також співпадає — у більшості випадків перед різким падінням інтенсивності ГКП реєструється зростання потоку на 1–2%.

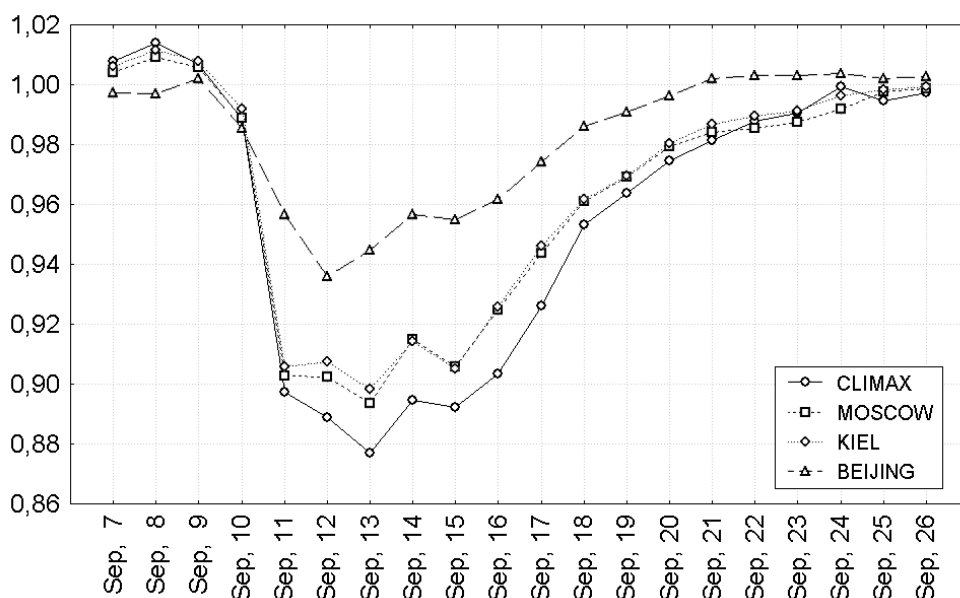


Рис. 1. Форбуш-ефект, зареєстрований 07.09.05 року після сонячного спалаху балу 15X

Така типова форма Форбуш-зниження (спочатку деяке збільшення інтенсивності ГКП, а потім різкий спад) зумовлена особливостями взаємодії потоку ГКП з міжпланетними ударними хвилями. Міжпланетні ударні хвилі більш характерні для подій, пов'язаних із сонячними спалахами і корональними викидами маси, і не так часто спостерігаються на фронтах високошвидкісних потоків від корональних дір. Як найбільш зручний індикатор міжпланетних ударних хвиль можна використати список раптових початків магнітних бурь (SSC), який представлений у вільному доступі за посиланням [12].

В даній роботі до першої групи було відібрано Форбуш-ефекти, пов'язані із сонячними спалахами, коли між потоком рентгенівського випромінювання та інтенсивністю галактичних космічних променів спостерігалась висока від'ємна кореляція.

2.2. Форбуш-ефекти, спричинені рекурентними ВШП СВ

До другої вибірки ми віднесли Форбуш-зниження, зумовлені високошвидкісними потоками сонячного вітру від корональних дір. Список корональних дір для опрацювання був взятий з сайту [13] (Coronal hole history). Кожну корональну діру було ототожнено з високошвидкісним потоком, зареєстрованим на орбіті Землі, після чого перевірено наявність модуляції цими потоками галактичних космічних променів [2]. Проаналізувавши всі Форбуш-зниження, які могли бути спричинені ВСП від корональних дір, для подальшого опрацювання було відібрано події з характерними для даного типу зниження фізичними характеристиками. Особлива увага приділялась формі профілю зниження, яка відповідно до нашої теоретичної моделі повинна бути близькою до прямокутної (рис. 2). Форбуш-ефекти, що мали суперечливу природу походження, виключались з подальшого розгляду [2].

3. РЕЗУЛЬТАТИ

Проаналізувавши велику кількість даних, ми переконались, що Форбуш-ефекти дуже різноманітні і головним чином відрізняються за амплітудою, характером розвитку (неперервні, ступінчасті), тривалістю головної фази (розвиваються швидко чи повільно), ступенем відновлення (з швидким відновленням, повільним, в декілька етапів або без відновлення). Таке різноманіття пояснюється багатьма факторами (накладання і злиття подій, величина міжпланетного магнітного поля (ММП), розмір міжпланетного збурення і швидкість його поширення, взаємодія збурення з міжпланетним струмовим шаром (МСШ) і

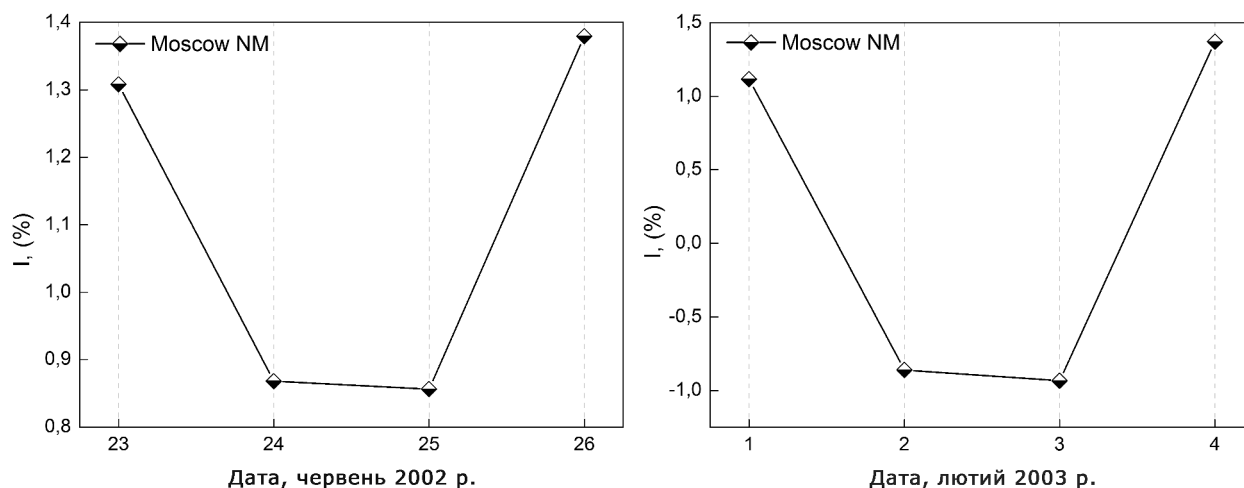


Рис. 2. Зниження інтенсивності I потоку ГКП, внаслідок модуляції рекурентним високошвидкісним потоком, зареєстровані 23.06.02 і 01.02.03 Московським нейтронним монітором.

т.п.), але найголовніший з них — модуляція ГКП різними сонячними джерелами, їх змінність і комбінація.

Провівши порівняльний статистичний аналіз Форбуш-ефектів у двох вибірках, ми отримали наступні результати.

1. Амплітуда, форма профілю Форбуш-ефекта та тривалість знижень

Для першої вибірки, куди було віднесено події, спричинені спорадичними високошвидкісними потоками, характерні великі (амплітуда $> 5\%$) і асиметричні Форбуш-ефекти (профіль часто двоступінчастий), що характеризуються глибоким і різким зниженням інтенсивності космічних променів. Тоді як Форбуш-ефектам, спричиненим ВШП від корональних дір, відповідають мала амплітуда (1–2%) та досить симетричний профіль.

Тривалість знижень (час від початку зниження до повного відновлення інтенсивності космічних променів) теж була різною. Для першої вибірки характерний час відновлення становив 3–10 діб, але у багатьох випадках через накладання подій взагалі не спостерігалось повного відновлення інтенсивності космічних променів до початкового рівня. Варто зазначити, що тривалість фази відновлення головним чином залежить від геліодовготи сонячного джерела, розмірів збурення, швидкості його поширення в міжпланетному просторі, а також місця потрапляння Землі в це збурення [6, 7, 8].

Тривалість Форбуш-знижень, спричинених ВШП від корональних дір, в середньому становила 5 діб. Даний результат (4–6 діб) узгоджується з часом життя відповідних високошвидкісних потоків на орбіті Землі, а це, в свою чергу, співвідноситься з часом проходження корональної діри через центральний меридіан Сонця (при протяжності корональних дір по довготі $30–90^\circ$) [3].

2. Радіус інтенсивної модуляції ГКП високошвидкісними потоками сонячного вітру

В даній роботі було досліджено зміну радіуса інтенсивної модуляції космічних променів з енергіями 1–20 Гев впродовж циклу сонячної активності. Між потоком рентгенівського випромінювання і інтенсивністю ГКП спостерігається антикореляція із зсувом, який і являє собою час запізнення Форбуш-знижень. Найменше запізнення було 1,5 доби, найбільше — 10 діб (рис.3а). Для всіх ФЕ, пов'язаних із сонячними спалахами, було визначено середньорічні значення часового зсуву.

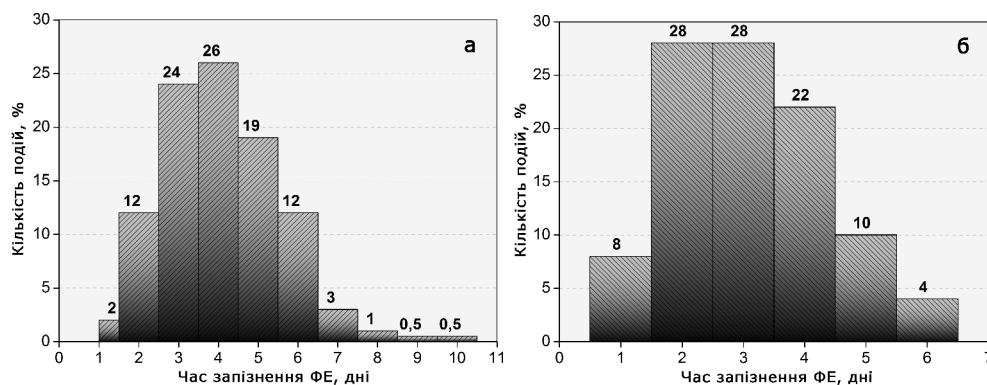


Рис. 3. Розподіл числа подій (%) по величині запізнення ФЕ відносно реєстрації максимального значення потоку рентгенівського випромінювання під час сонячних спалахів (а) та відносно реєстрації високошвидкісних потоків рекурентного СВ на орбіті Землі (б).

Для другої групи Форбуш-знижень запізнення визначалось відносно першого дня, коли на орбіті Землі реєструвався високошвидкісний потік від корональної діри. Найчастіше Форбуш-зниження на-ставало через 2–4 дні після реєстрації потоку (рис. 3б). Для всіх ФЕ, зумовлених рекурентними ВСП, також було визначено середньорічні значення часової затримки.

Знаючи час запізнення, швидкість поширення у міжпланетному просторі ударної хвилі після сонячного спалаху (для першої вибірки ФЕ) та швидкість потоку сонячного вітру з корональних дір (для другої вибірки ФЕ), можна визначити розміри зони ефективної модуляції космічних променів впродовж циклу сонячної активності.

Виявилось, що радіус зони модуляції космічних променів *спорадичними* високошвидкісними потоками змінюється впродовж циклу від 1,6 до 2,6 а.о. (рис. 4) і корелює з циклом сонячної активності (коефіцієнт кореляції з числами Вольфа $r = 0,88$). Даний результат узгоджується з науковими даними щодо варіацій розміру зовнішньої геліосфери в 11-річному циклі.

Розмір зони модуляції ГКП *рекурентними* ВШП антикорелює з циклом сонячної активності (коефіцієнт кореляції $r = -0,78$) і змінюється від 1,7 а.о. в максимумі до 2,3 а.о. в мінімумі сонячної активності (рис. 4).

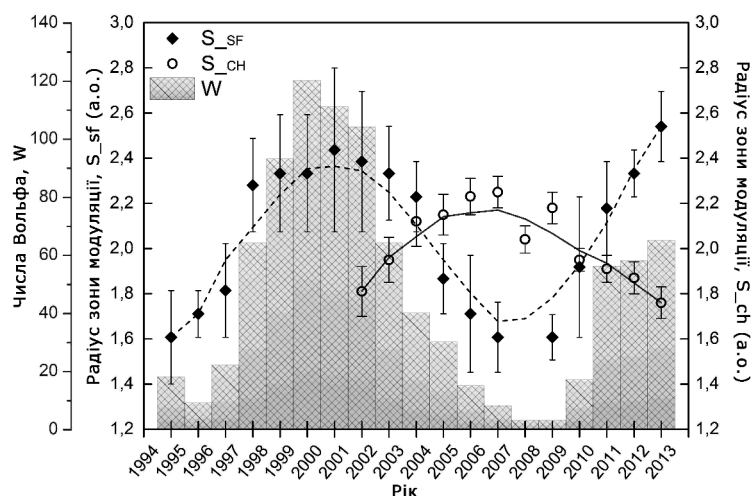


Рис. 4. Зміна радіусу зони модуляції ГКП спорадичними ВШП (S_{SF}) і рекурентними ВШП (S_{CH}) впродовж циклу сонячної активності (W)

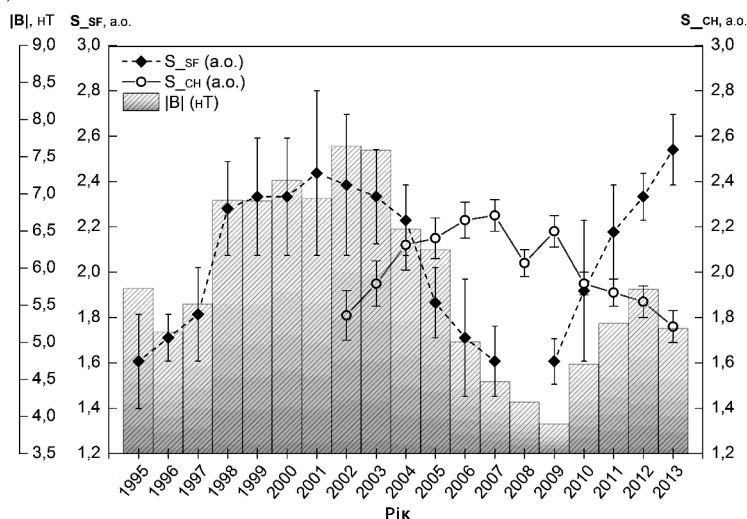


Рис. 5. Радіус зони модуляції ГКП для ФЕ, спричинених сонячними спалахами (S_{SF}) і ВШП від корональних дір (S_{CH}), у порівнянні з міжпланетним магнітним полем ($|B|$)

Радіус зони модуляції ГКП був співставлений з середньорічними значеннями модуля міжпланетного магнітного поля (рис. 5).

Хід кривих зберігається, коефіцієнт кореляції між модулем магнітного поля і радіусом модуляції для Форбуш-знижень першого і другого типу становить 0,72 і $-0,39$ відповідно.

4. ВИСНОВКИ

На основі статистичного порівняльного аналізу виявлено, що збурення, спричинені нерекурентними сонячними джерелами ефективніше модулюють космічні промені, ніж збурення від рекурентних джерел.

Наше дослідження показало, що розмір зони ефективної модуляції космічних променів зростає від 1,6 а.о. в мінімумі до 2,6 а.о. в максимумі сонячної активності для Форбуш-ефектів, спричинених спорадичними високошвидкісними потоками сонячного вітру. Цікаво, що розмір зони модуляції від рекурентних потоків з корональних дір навпаки, максимального значення досягає в роки мінімальної фази сонячної активності і становить 2,3 а.о., а з ростом активності спадає до 1,7 а.о. Вірогідніше за все, це можна пояснити тим, що в мінімумі циклу високошвидкісні потоки від корональних дір «живуть» довше, ніж у максимумі.

Знайдена в роботі залежність важлива для короткочасних прогнозів швидких варіацій атмосферного тиску, спричинених Форбуш-зниженнями, дозволяє краще зрозуміти фізику сонячно-земних зв'язків та може бути використана при побудові моделей модуляції космічних променів різними типами високошвидкісних потоків.

1. Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А. и др. Чем обусловлены и с чем связаны Форбуш-эффекты? // Изв. РАН, Сер. физ. — 2001. — **65**, № 3. — С. 373–376.
2. Ключева А.И. Эффекты понижения интенсивности галактических космических лучей, связанные с высокоскоростными потоками от корональных дыр // Космическая наука и технология. — 2014. — **20**, № 2. — С. 61–66.
3. Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. — М.: Мир, 1976. — 302 с.
4. Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena // Proc. IAU Symp. — 2009. — **257**. — P. 439–450.
5. Cane H.V. Coronal mass ejections and Forbush decreases // Space Sci. Rev. — 2000. — **93**. — P. 55–77.
6. Cane H.V., Richardson I.G., von Rosenvinge T.T., Wibberenz G. Cosmic ray decreases and shock structure: A multispacecraft study // J. Geophys. Res. — 1994. — **99**, № A11. — P. 21429–21441.
7. Iucci N., Parisi M., Storini M., Villaresi G. High speed solar wind streams and galactic cosmic ray modulation // Nuovo Cimento C. — 1979. — **2C**. — P. 421–438.
8. Lockwood J.A., Webber W.R., Jokipii J.R. Characteristic recovery times of Forbush-type decreases in the cosmic radiation. I — Observations at Earth at different energies // J. Geophys. Res. — 1986. — **91**. — P. 2851–2857.
9. http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/indices/old_indices
10. <ftp://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni>
11. <http://cr0.izmiran.rssi.ru/common/links.htm>
12. ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solar_data/sudden_commencements/storm2.ssc
13. http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html

Надійшла до редакції 30.07.2014