

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-06>

УДК 550.385.37: 550.388

СТАТИСТИКА ГЕОМАГНІТНИХ БУР ПРОТЯГОМ ЦИКЛУ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ (2009 – 2020 рр.)

Л. Ф. Черногор, М. Ю. Голуб, Y. Luo

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

Надійшла до редакції 17 листопада 2020 р.

Актуальність. Атмосфера та геокосмос широко використовується в якості радіоканалу при розв'язанні задач радіозв'язку, радіонавігації, радіолокації, радіопеленгації, радіоастрономії та дистанційного радіозондування навколоземного середовища з поверхні планети або Землі з космосу. Параметри атмосферно-космічного радіоканалу визначаються станом атмосферно-космічної погоди, яка формується, в основному, нестационарними процесами на Сонці (сонячними бурями) та частково високоенергетичними процесами на Землі та в атмосфері. До найбільш сильних збурень атмосферно-космічного радіоканалу призводять геокосмічні бурі. Важливо, що ці бурі відрізняються великою різноманітністю, немає двох однакових бур. У бур є спільні риси, також є індивідуальні особливості. Ті та інші у теперішній час вивчені недостатньо. Їх вивчення є актуальним завданням космічної геофізики та космічної радіофізики. Для виявлення загальних закономірностей, доцільним є статистичний підхід до аналізу великої кількості бур.

Метою цієї роботи є статистичний аналіз параметрів сонячного вітру та геомагнітного поля протягом 24-го циклу сонячної активності (2009 – 2020 рр.).

Методи і методологія. В якості вихідних даних обрані параметри збуреного сонячного вітру (концентрація n_{sw} , швидкість V_{sw} та температура T_{sw} частинок), збурені значення B_y - та B_z -компонент міжпланетного магнітного поля, що є причиною магнітних бур на Землі, а також індекси геомагнітної активності (AE , D_{st} та K_p). У даній роботі розглянуті геомагнітні бурі з $K_p \geq 5$ або $G1$, $G2$, $G3$ та $G4$. Всього було 153 бурі з $K_p \geq 5$. Проаналізовані статистичні ряди максимальних значень n_{sw} , V_{sw} , T_{sw} , компонент B_y та B_z , індексів AE , D_{st} та K_p , а також мінімальні значення B_z -компоненти та індексу D_{st} .

Результати. Визначені основні статистичні характеристики параметрів сонячного вітру, міжпланетного магнітного поля та геомагнітного поля для 153 подій, що мали місце протягом 24-го циклу сонячної активності.

Висновки. Геомагнітна обстановка протягом 24-го циклу сонячної активності була більш спокійною, ніж протягом 23-го циклу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: геокосмічна буря, магнітна буря, параметри сонячного вітру, параметри міжпланетного магнітного поля, індекси геомагнітної активності, статистичні характеристики.

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF GEOMAGNETIC STORM ACTIVITY DURING SOLAR CYCLE 24, 2009–2020

L. F. Chernogor, M. Yu. Holub, Y. Luo

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Square, 61022, Kharkiv, Ukraine

Urgency. The atmosphere and geospace are widely used as a radio channel in solving problems of radar, radio navigation, direction finding, radio communication, radio astronomy, and the remote sensing of the Earth from space or the near-earth environment from the surface of the planet. The parameters of the atmospheric-space radio channel are determined by the state of tropospheric and space weather, which is formed mainly by non-stationary processes on the Sun (solar storms) and partly by high-energy processes on the Earth and in the atmosphere. Geospace storms give rise to the strongest disturbances of the atmospheric-space radio channel, and it is important to note that these storms are diverse, so that no two storms are alike. At the same time, storms have both similar and individual features. Currently, there is insufficient knowledge about both of these features, and their study remains an urgent task of space geophysics and space radio physics. In particular, the identification of general patterns is advisable by performing a statistical analysis of a large number of storms.

The aim of this work is to statistically analyze the parameters of the solar wind and geomagnetic field during the Solar Cycle 24 activity (2009–2020).

Methods and Methodology. The parameters of the disturbed solar wind (number density n_{sw} , velocity V_{sw} , and temperature T_{sw}), the disturbed values of the B_y - and B_z -components of the interplanetary magnetic field, which is the cause of magnetic storms on Earth, as well as the indices of geomagnetic activity (AE , D_{st} and K_p) are selected as source input to the study. In this paper, geomagnetic storms with $K_p \geq 5$ or $G1$, $G2$, $G3$, and $G4$ geomagnetic storms are considered. In total, there were 153 storms with $K_p \geq 5$. The time series of the n_{sw} , V_{sw} , T_{sw} maximum values, of the B_y - and B_z -components, and of the AE , D_{st} and K_p indices, as well as of the B_z -component and the D_{st} index minimum values have been analyzed.

Results. The main statistical characteristics of the parameters of the solar wind, interplanetary magnetic field, and of the geomagnetic field have been determined for 153 events that took place during Solar Cycle 24.

Conclusions. The geomagnetic situation during Solar Cycle 24 was calmer than during Solar Cycle 23.

KEY WORDS: geospace storm, magnetic storm, solar wind parameters, interplanetary magnetic field parameters, geomagnetic activity indices, statistical characteristics.

СТАТИСТИКА ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ В ТЕЧЕНИЕ ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ (2009 – 2020 гг.)

Л. Ф. Черногор, М. Ю. Голуб, У. Луо

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4,
Украина

Актуальность. Атмосфера и геокосмос широко используется в качестве радиоканала при решении задач радиосвязи, радионавигации, радиолокации, радиопеленгации, радиоастрономии и дистанционного радиозондирования околоземной среды из поверхности планеты либо Земли из космоса. Параметры атмосферно-космического радиоканала определяются состоянием атмосферно-космической погоды, которая формируется, в основном, нестационарными процессами на Солнце (солнечными бурями) и частично высокоэнергетическими процессами на Земле и в атмосфере. К наиболее сильным возмущениям атмосферно-космического радиоканала приводят геокосмические бури. Важно, что эти бури отличаются большим разнообразием, нет двух одинаковых бурь. У бурь есть общие черты и есть индивидуальные особенности. И те, и другие в настоящее время изучены недостаточно. Их изучение является актуальной задачей космической геофизики и космической радиофизики. Для выявления общих закономерностей целесообразен статистический подход к анализу большого количества бурь.

Целью настоящей работы является статистический анализ параметров солнечного ветра и геомагнитного поля в течение 24 цикла солнечной активности (2009 – 2020 гг.).

Методы и методология. В качестве исходных данных выбраны параметры возмущенного солнечного ветра (концентрация n_{sw} , скорость V_{sw} и температура T_{sw} частиц), возмущенные значения B_y - и B_z -компонент межпланетного магнитного поля, являющегося причиной магнитных бурь на Земле, а также индексы геомагнитной активности (AE , D_{st} и K_p). В данной работе рассмотрены геомагнитные бури с $K_p \geq 5$ или $G1$, $G2$, $G3$ и $G4$. Всего было 153 бури с $K_p \geq 5$. Проанализированы статистические ряды максимальных значений n_{sw} , V_{sw} , T_{sw} , компонент B_y - и B_z -индексов AE , D_{st} и K_p , а также минимальные значения B_z -компоненты и индекса D_{st} .

Результаты. Определены основные статистические характеристики параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и геомагнитного поля для 153 событий, имевших место в течение 24-го цикла солнечной активности.

Выводы. Геомагнитная обстановка в течение 24-го цикла солнечной активности была более спокойной, чем в течение 23-го цикла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геокосмическая буря, магнитная буря, параметры солнечного ветра, параметры межпланетного магнитного поля, индексы геомагнитной активности, статистические характеристики.

ВСТУП

Атмосфера та геокосмос широко використовуються в якості радіоканалу при розв'язанні задач радіозв'язку, радіоастрономії, радіолокації, радіопеленгації, радіоастрономії та дистанційного радіозондування навколоземного середовища з поверхні планети або Землі з космосу (див., наприклад [1 – 7]).

Параметри атмосферно-космічного радіоканалу визначаються станом атмосферно-космічної погоди, яка формується, в основному, нестационарними процесами на Сонці (сонячними бурями) та частково високоенергетичними процесами на Землі та в атмосфері [8 – 15]. До найбільш сильних збурень атмосферно-космічного радіоканалу призводять геокосмічні бурі. Геокосмічні бурі зачіпають всі підсистеми в системі магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля. При цьому виникають сильні збурення геомагнітного поля (магнітна буря), атмосфери (атмосферна буря), іоносфери (іоносферна буря) та електричного поля атмосферно – іоносферного – магнітосферного походження (електрична буря) [16]. На поширення радіохвиль різних діапазонів найсильніше впливають іоносферні бурі та в меншій мірі, атмосферні бурі. Протягом іоносферних збурень концентрація електронів може збільшитися в 2 – 3 рази на F-області іоносфери або на 2 – 3 порядки в D-області іоносфери [17 – 21]. Все це призводить до значного ослаблення радіохвиль.

Під час негативних іоносферних збурень концентрація електронів у F-області іоносфери, навпаки, може зменшитися в 5 – 10 разів [17 – 21]. При цьому частотна ємність іоносферного радіоканалу значно зменшується аж до повної втрати для ВЧ діапазону (3 – 30 МГц). Крім зміни регулярних параметрів, в іоносфері під час бур може істотно змінитися її неоднорідна структура, яка веде до розсіювання і ослаблення радіохвиль в широкому діапазоні частот. Іоносферні бурі супроводжуються магнітними бурями та навпаки, магнітні бурі супроводжуються іоносферними бурями. Важливо, що ці бурі відрізняються великою різноманітністю, немає двох однакових бур [16]. У бур є спільні риси, також є

індивідуальні особливості. Ці риси у теперішній час вивчені недостатньо [22 – 27]. Їх вивчення є актуальним завданням космічної геофізики та космічної радіофізики. Для виявлення загальних закономірностей доцільним є статистичний підхід до аналізу великої кількості бур.

Морфологія іоносферних збурень вивчалася у [28].

Статистичний аналіз іоносферних збурень за два цикли сонячної активності виконаний у роботі [29], а магнітних бур – у роботах [29 – 31].

У роботі [30] виконано аналіз найбільш сильних геомагнітних бур за період з 1844 по 1993 рр. Робота [31] присвячена аналізу геомагнітних бур, що мали місце в 1932 – 2009 рр. Статистика магнітних та іоносферних бур обговорюється в [32]. В цій роботі введено нові індекси, що описують інтенсивність геокосмічних, магнітних та іоносферних бур.

Цікавим є статистичний аналіз варіацій параметрів сонячного вітру та їх наслідків – геомагнітних бур – за останній цикл сонячної активності.

Метою цієї роботи є статистичний аналіз параметрів сонячного вітру та геомагнітного поля протягом 24-го циклу сонячної активності (2009 – 2020 рр.).

ВИХІДНІ ДАНІ

В якості вихідних даних обрані параметри збуреного сонячного вітру (концентрація n_{sw} , швидкість V_{sw} та температура T_{sw} частинок), збурені значення B_y - та B_z -компонент міжпланетного магнітного поля, що є причиною магнітних бур на Землі, а також індекси геомагнітної активності (AE , D_{st} та K_p). [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>]. Як відомо, індекс AE характеризує магнітну активність у полюсів планети (у авроральній області). Індекс D_{st} описує посилення кільцевого струму, що свідчить про геомагнітну активність у екваторіальній області. Індекс K_p , інакше планетарний індекс, який має логарифмічну шкалу, описує геомагнітну активність, усереднену у межах планети за даними 13 магнітних обсерваторій, розміщених між $\pm 44^\circ$ та $\pm 60^\circ$ геомагнітної широти. Іноді сила магнітних бур характеризується G -індексом, де $G = K_p - 4$. При $K_p = 5$ індекс $G1$ відповідає слабкій бурі, при $K_p = K_{pmax} = 9$ маємо $G5$, що відповідає екстремально сильній бурі.

У даній роботі розглянуті геомагнітні бурі з $K_p \geq 5$ або $G1$, $G2$, $G3$ та $G4$. Всього було 153 бурі з $K_p \geq 5$. Проаналізовані статистичні ряди максимальних значень n_{sw} , V_{sw} , T_{sw} , компонент B_y - та B_z -індексів AE , D_{st} та K_p , а також мінімальні значення B_z -компоненти та індексу D_{st} . Наявність негативних значень B_z -компоненти свідчить про настання геомагнітної бурі. Початку бурі відповідають значення $D_{stmax} > 0$. Мінімальні негативні значення D_{st} , точніше їх скориговані значення D_{st} , описують силу магнітної бурі [16]. При D_{st} , рівним 11 – 20, 21 – 40, 41 – 70, 71 – 120, 121 – 200, 201 – 300, 301 – 500, 501 – 1000, 1001 – 2000 нТл слід очікувати бур, які є слабкою, дуже слабкою, досить помірною, помірною, сильною, дуже сильною, надсильною, вкрай сильною, виключно сильною та екстремальною відповідно.

Стан космічної погоди протягом двох надсильних геомагнітних бур, що мали місце протягом 24-го циклу сонячної активності, ілюструє Рис. 1 та Рис. 2. Для першої бурі $n_{swmax} = 41.7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$; $V_{swmax} = 742 \text{ км/с}$; $T_{swmax} = 11.2 \cdot 10^5 \text{ К}$; $p_{swmax} = 30.61 \text{ нТл}$; $B_{zmin} = -26.3 \text{ нТл}$; $B_{zmax} = 16.1 \text{ нТл}$; $B_{ymin} = -11.4 \text{ нТл}$; $B_{ymax} = 23.5 \text{ нТл}$; $\epsilon_{Amax} = 285.71 \text{ ГДж/с}$; $AE_{max} = 1636 \text{ нТл}$; $K_{pmax} = 8.3$; $D_{stmin} = -204 \text{ нТл}$; $D_{stmax} = 35 \text{ нТл}$. Для другої бурі $n_{swmax} = 13.9 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$; $V_{swmax} = 817 \text{ км/с}$; $T_{swmax} = 33.8 \cdot 10^5 \text{ К}$; $p_{swmax} = 7.3 \text{ нТл}$; $B_{zmin} = -24.2 \text{ нТл}$; $B_{zmax} = 10.4 \text{ нТл}$; $B_{ymin} = -10.7 \text{ нТл}$; $B_{ymax} = 9.5 \text{ нТл}$; $\epsilon_{Amax} = 191.82 \text{ ГДж/с}$; $AE_{max} = 1442 \text{ нТл}$; $K_{pmax} = 8.3$; $D_{stmin} = -142 \text{ нТл}$; $D_{stmax} = 32 \text{ нТл}$.

РЕЗУЛЬТАТИ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ

Спочатку за період 2009 – 2020 рр. будувалися статистичні ряди для максимальних значень кожного параметра p (p_{min} до p_{max}). На підставі цих рядів створювалися гістограми, які в тих випадках, де це доцільно, доповнювалися аналітичними законами розподілу випадкових значень p . Далі обчислювалися середні значення \bar{p} та середньоквадратичне відхилення σ , а також середньоквадратичне відхилення середнього значення $\sigma_p = \sigma / \sqrt{N}$, де N – число відліків.

Результати обчислень статистичних характеристик наведені в Таблиці 3. Таблиці видно, що найбільш ймовірні значення параметрів наступні: $n_{swmax} = (32.0 \pm 1.4) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, $V_{swmax} = 617.3 \pm 7.3 \text{ км/с}$, $T_{swmax} = (4.8 \pm 0.3) \cdot 10^5 \text{ К}$, $B_{ymax} = 10.42 \pm 0.41$, $B_{zmin} = -10.7 \pm 0.4 \text{ нТл}$, $AE_{max} = 1095.0 \pm 21.5 \text{ нТл}$, $D_{stmin} = -(69.5 \pm 2.8) \text{ нТл}$, $D_{stmax} = 20.7 \pm 1.1 \text{ нТл}$ і $K_{pmax} = 5.76 \pm 0.06$. Як видно, похибка оцінки \bar{p} зазвичай не перевищує 1–6 %.

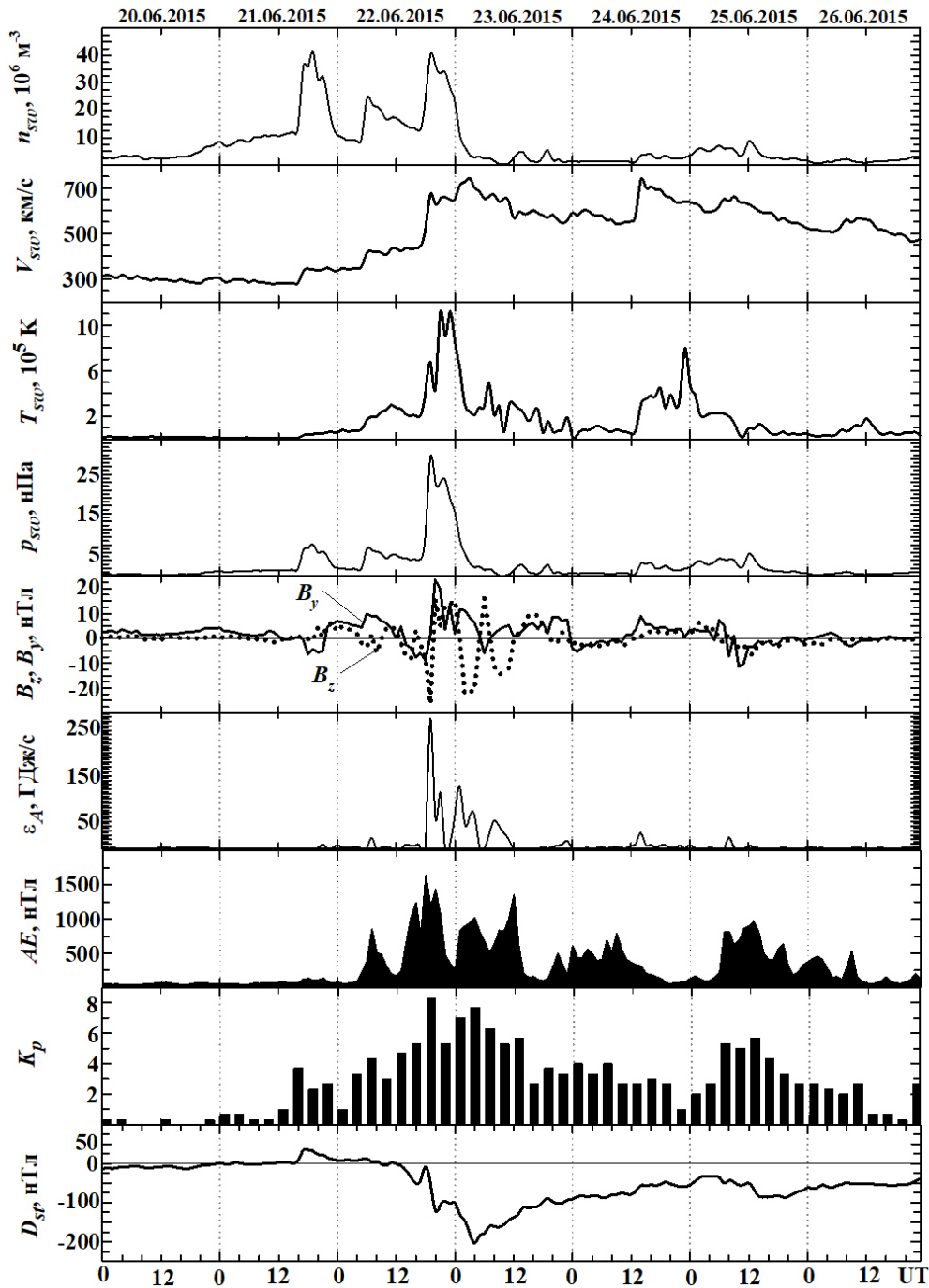


Рис. 1. Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряні концентрації частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} та розрахованого динамічного тиску p_{sw} , виміряних компонент B_z та B_y міжпланетного магнітного поля; розрахованих значень енергії ϵ_A , переданої сонячним вітром магнітосфері Землі в одиницю часу, AE -індексу, K_p -індексу та D_{st} -індексу (за даними сайту <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) в період 20 – 26 червень 2015 р. Дати вказані уздовж осі абсцис.

Fig. 1. UT variations in the solar wind parameters: measured concentration, n_{sw} , of particles, temperature T_{sw} , radial velocity V_{sw} , calculated dynamic pressure p_{sw} , measured B_z and B_y components of the interplanetary magnetic field; calculated values of the energy, ϵ_A , transferred from the solar wind into the Earth's magnetosphere per unit time, AE -index, K_p -index, and D_{st} -index (retrieved from <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) for June 20 – 26, 2015 period. Dates are indicated along the upper abscissa.

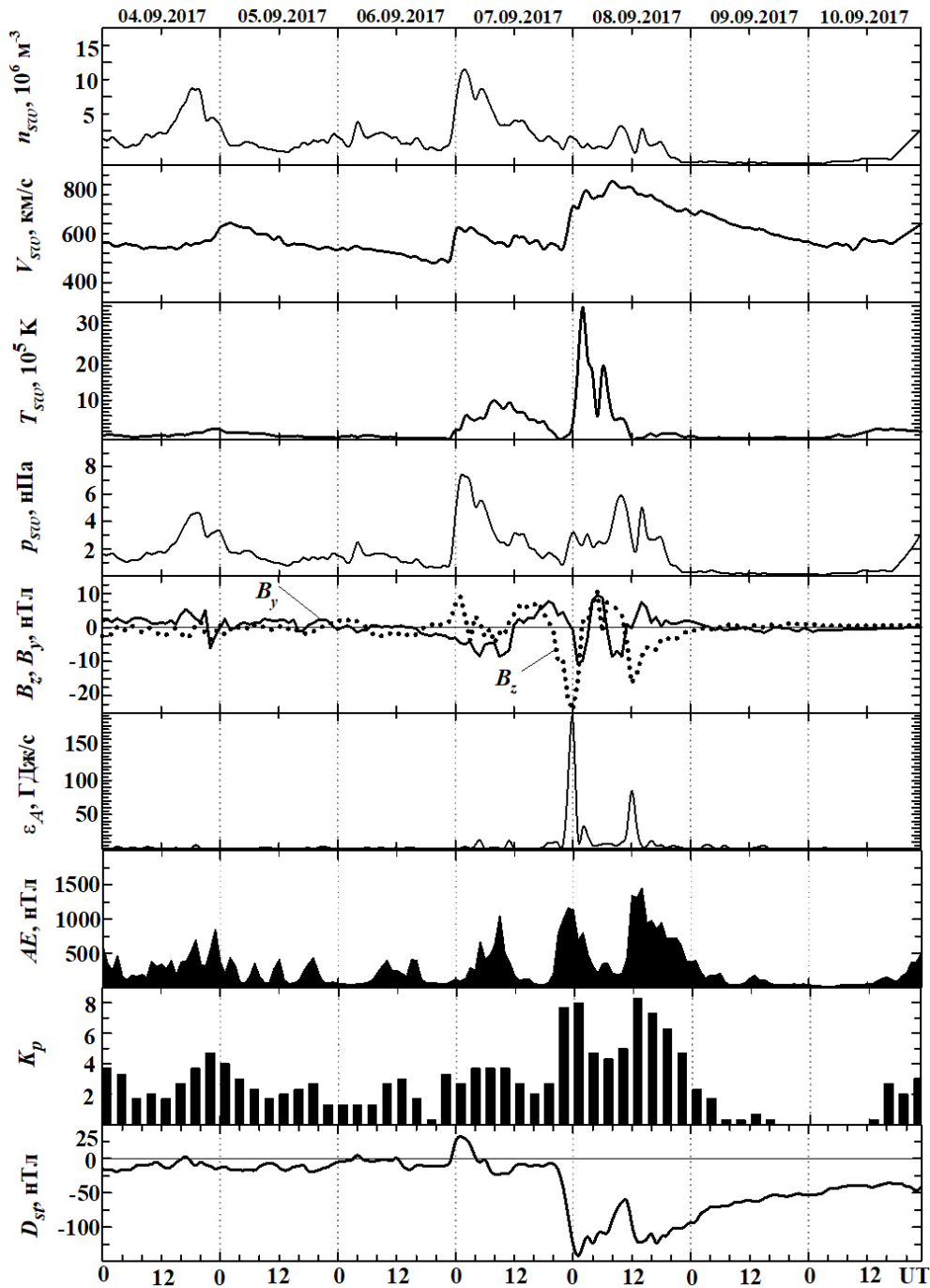
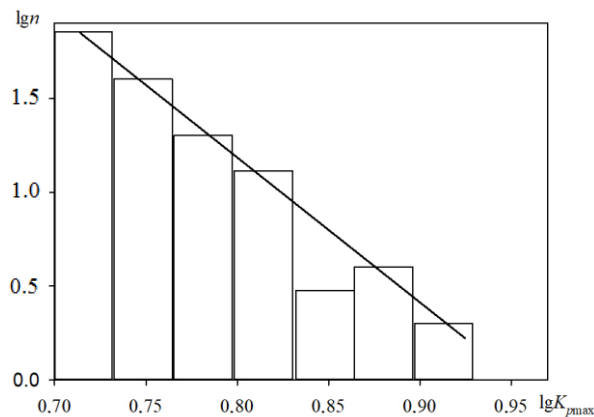


Рис. 2. Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряні концентрації частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} та розрахованого динамічного тиску p_{sw} , виміряних компонент B_z та B_y міжпланетного магнітного поля; розрахованих значень енергії ϵ_A , переданої сонячним вітром магнітосфері Землі в одиницю часу, AE -індексу, K_p -індексу та D_{st} -індексу (за даними сайту <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) в період 4 – 10 вересня 2017 р. Дати вказані уздовж осі абсцис.

Fig. 2. UT variations in the solar wind parameters: measured concentration, n_{sw} , of particles, temperature T_{sw} , radial velocity V_{sw} , calculated dynamic pressure p_{sw} , measured B_z and B_y components of the interplanetary magnetic field; calculated values of the energy, ϵ_A , transferred from the solar wind into the Earth's magnetosphere per unit time, AE -index, K_p -index, and D_{st} -index (retrieved from <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) for September 4 – 10, 2017 period. Dates are indicated along the upper abscissa.

Таблиця. Статистичні характеристики основних параметрів сонячного вітру, міжпланетного магнітного поля та індексів геомагнітного поля

	n_{swmax}	V_{swmax}	T_{swmax}	B_{ymax}	B_{zmin}	D_{smin}	D_{smax}	AE_{max}	K_{pmax}
N	153	153	153	153	153	153	142	136	153
\bar{p}	31.99	617.25	4.81	10.42	-10.73	-69.52	20.68	1094.89	5.76
σ	17.70	89.95	3.58	5.13	4.29	34.57	12.59	250.63	0.75
$\sigma_{\bar{p}}$	1.43	7.27	0.29	0.41	0.35	2.79	1.06	21.49	0.06
$\sigma_{\bar{p}} / \bar{p}$	0.04	0.01	0.06	0.03	0.05	0.04	0.03	0.01	0.01

Рис. 3. Гістограма для $\lg K_{pmax}$. Прямая лінія – регресія (1).Fig. 3. Histogram for $\lg K_{pmax}$. Straight line is a regression (1).

Приклад гістограми для $\lg K_{pmax}$ наведено на Рис. 3. З Рис. 3 видно, що при збільшенні $\lg K_{pmax}$ логарифм числа подій досить швидко убуває. Отримана наступна регресія:

$$\lg n \approx -8.13 \lg K_{pmax} + 7.65 \quad (1)$$

Якщо ця регресія справедлива також для $K_{pmax} > 8.3$, то при K_{pmax} , рівному 9, 10 и 11 маємо число подій за цикл сонячної активності, що дорівнює 0.78, 0.33 и 0.15. Тоді середній інтервал часу Δt між магнітними бурями з цими K_{pmax} становить близько 15, 36 та 80 років. Очевидно, що значення Δt сильно занижені. Це означає, що співвідношення (1) можна застосувати при $K_{pmax} < 9$.

Гістограма для $\lg K_{pmax}$ може бути апроксимована лінійним законом, а для K_{pmax} – степеневим. Гістограма для V_{sw} апроксимована нормальним законом з $\bar{V}_{sw} \approx 617$ км/с та $\sigma \approx 90$ км/с. Інші гістограми можуть бути апроксимовані законом Релея.

ОБГОВОРЕННЯ

У роботі проведено статистичний аналіз параметрів сонячного вітру, міжпланетного магнітного поля та індексів геомагнітної активності протягом 24-го циклу сонячної активності. Загальна кількість бур з $K_{pmax} \geq 5$ склало 153. Досить велика статистика дозволила надійно оцінити значення \bar{p} , σ та σ_p .

Число бур при збільшенні K_{pmax} , як і слід було очікувати, швидко зменшувалося. Тільки для двох бур $K_{pmax} = 8.3$. Значення $D_{smin} \approx -223$ нТл 17 березня 2015 р. та $D_{smin} = -204$ нТл 23 червня 2015 р. У той самий час протягом 23-го циклу сонячної активності спостерігалось три бурі зі значно меншими значеннями D_{smin} , а саме -383 нТл (30 жовтня 2003 р.), -471 нТл (20 листопада 2003 р.) та -383 нТл (8 листопада 2004 р.).

Таким чином, геомагнітна обстановка протягом 24-го циклу сонячної активності була більш спокійною, ніж в 23-му циклі.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Визначено основні статистичні характеристики параметрів сонячного вітру, міжпланетного магнітного поля та геомагнітного поля для 153 подій магнітних бур з $K_{pmax} \geq 5$ мали місце протягом 24-го циклу сонячної активності.
2. Геомагнітна обстановка протягом 24-го циклу сонячної активності була більш спокійною, ніж в 23-му циклі.

ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Дослідження Черногора Л. Ф., Голуб М. Ю. та Yiyang Luo виконано в рамках проекту Національного фонду досліджень України (номер 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля–атмосфера–іоносфера»). Також робота Черногора Л. Ф. частково підтримана в рамках держбюджетної НДР, заданої МОН України (номер держреєстрації 0119U002538).

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

L. F. Chernogor  <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

M. Yu. Holub  <https://orcid.org/0000-0001-7900-1484>

Y. Luo  <https://orcid.org/0000-0002-3376-5814>

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Goodman JM. Space Weather and Telecommunications. Springer, 2005: XX, 382 p.
2. Благовещенский ДВ. Влияние геомагнитных бурь/суббурь на ионосферу. Ч. 1. (обзор). Геомагнетизм и аэрономия, 2013, 53 (3): 291–307.
3. Благовещенский ДВ. Влияние геомагнитных бурь/суббурь на распространение КВ (обзор). Геомагнетизм и аэрономия, 2013, 53 (4): 435–450.
4. Blagoveshchensky D., Sergeeva M. Impact of geomagnetic storm of September 7 – 8, 2017 on ionosphere and HF propagation: A multi-instrument study. Advances in Space Research, 2019, 63 (1): 239 – 256. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.07.016>
5. Chernogor LF., Garmash KP., Guo Q., Zheng Y. Effects of the Strong Ionospheric Storm of August 26, 2018: Results of Multipath Radiophysical Monitoring. Geomagnetism and Aeronomy. 2021;61(1):73–91. <https://doi.org/10.1134/S001679322006002X>
6. Chernogor LF., Garmash KP., Guo Q., Luo Y., Rozumenko VT., Zheng Y. Ionospheric storm effects over the People's Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding. Advances in Space Research. 2020;66(2): 226–242. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.037>
7. Guo Q., Chernogor LF. Polar Communications. In book: Cui W., Fu S., Hu Z. (eds) Encyclopedia of Ocean Engineering. Springer, Singapore, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6963-5_112-1
8. Freeman JW. Storms in Space. Cambridge University Press, London, New York, 2001.
9. Space Weather (Geophysical Monograph). In ed. Song P., Singer H., Siscoe G. Union, Washington D.C., 2001. ISBN 0-87590-984-1.
10. Benestad RE. Solar activity and Earth's climate. Springer-Praxis. 2002: 287
11. Carlowicz MJ., Lopez RE. Storms from the Sun. – Joseph Henry Press, Washington DC, 2002. ISBN 0-309-07642-0.
12. Lathuillère C., Menvielle M., Lilensten J., Amari T., Radicella SM. From the Sun's atmosphere to the Earth's atmosphere: an overview of scientific models available for space weather developments. Annales Geophys. 2002;20(7):1081–1104.
13. Владимирский БМ., Темурьянц НА., Мартынюк ВС. Космическая погода и наша жизнь. Фрязино: Век 2, 2004:224 с.
14. Bothmer V., Daglis I. Space Weather: Physics and Effects. Springer-Verlag New York, 2006. ISBN 3-642-06289-X.
15. Lilensten J., Bornarel J. Space Weather. Environment and Societies. Springer, 2006. ISBN 978-1-4020-4331-4.
16. Черногор ЛФ., Домнин ИФ. Физика геокосмических бурь: Монография. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, 2014;408 с.
17. Данилов АД., Морозова ЛД. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (обзор). Геомагнетизм и аэрономия. 1985;25(5):705–721.

18. Prölss GW. Ionospheric F-region storms. Handbook of atmospheric electrodynamics 2,1995;2:195–248.
19. Buonsanto M. Ionospheric storms – A review. Space Science Reviews, 1999;88(3–4):563–601. <https://doi.org/10.1023/A:1005107532631>
20. Danilov AD., Lastovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. Int. J. Geomag. Aeron, 2001;2(3):209–224.
21. Данилов АД. Реакция области F на геомагнитные возмущения (Обзор). Гелиогеофизические исследования. 2013;5:1–33.
22. Blanch E., Altadill D., Boška J., Burešová D., Hernández-Pajares M. November 2003 event: Effects on the Earth's ionosphere observed from ground-based ionosonde and GPS data. In: Annales Geophys. 2005;23:3027–3034.
23. Pirog OM., Polekh NM., Zherebtsov GA., Smirnov VF., Shi J., Wang X. Seasonal variations of the ionospheric effects of geomagnetic storms at different latitudes of East Asia. Adv. Space Res, 2006;37(5):1075–1080.
24. Liu J., Wang W., Burns A., Yue X., Zhang S., Zhang Y., Huang C. Profiles of ionospheric storm-enhanced density during the 17 March 2015 great storm. J. Geophys. Res. 2016;121(1):727–744. <https://doi.org/10.1002/2015JA021832>
25. Polekh N., Zolotukhina N., Kurkin V., Zherebtsov G., Shi J., Wang G., Wang Z. Dynamics of ionospheric disturbances during the 17–19 March 2015 geomagnetic storm over East Asia. Advances in Space Research. 2017;60(11):2464–2476. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.030>
26. Borries C., Berdermann J., Jakowski N., Wilken V. Ionospheric storms – A challenge for empirical forecast of the total electron content. Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2015 Apr;120(4):3175–3186. <https://doi.org/10.1002/2015JA020988>
27. Кацко СВ., Смельянов ЛЯ., Черногор ЛФ. Особливості іоносферної бурі 21–24 грудня 2016 р. Кінематика і фізика небесних тіл. 2021;37(2):57–74. <https://www.mao.kiev.ua/biblio/jscans/kfnt/2021-37/kfnt-2021-37-2-04-katsko.pdf>
28. Matsushita SA study of the morphology of ionospheric storms. Journal of Geophysical Research. 1959;64(3):305–321. <https://doi.org/10.1029/JZ064i003p00305>
29. Vijaya Lekshmi D., Balan N., Tulasi Ram S., Liu JY. Statistics of geomagnetic storms and ionospheric storms at low and mid latitudes in two solar cycles. J. Geophys. Res. 2011;116(A11328). <https://doi.org/10.1029/2011JA017042>
30. Willis DM., Stevens PR., Crothers SR. Statistics of the largest geomagnetic storms per solar cycle (1844 – 1993). Ann. Geophys. 1997;15(6):719–728. <https://doi.org/10.1007/s00585-997-0719-5>
31. Yakovchouk OS., Mursula K., Holappa L., Veselovsky IS., Karinen A. Average properties of geomagnetic storms in 1932–2009. Geophys. Res. 2012;117(A3). <https://doi.org/10.1029/2011JA017093>
32. Черногор ЛФ. Фізика геокоsmічних бур. Космічна наука і технологія. 2021;27(1(128)):3–77. <https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003>

REFERENCES

1. Goodman JM. Space Weather and Telecommunications. Springer, 2005.
2. Blagoveshchenskii DV. Effect of Geomagnetic Storms (Substorms) on the Ionosphere: 1. A Review. Geomagnetism and Aeronomy. 2013;53(3):275–290. <https://doi.org/10.1134/S0016793213030031>
3. Blagoveshchenskii DV. Effect of magnetic storms (substorms) on HF propagation: A review. Geomagn. Aeron. 2013;53(4):409–423. <https://doi.org/10.1134/S0016793213040038>
4. Blagoveshchensky D., Sergeeva M. Impact of geomagnetic storm of September 7 – 8, 2017 on ionosphere and HF propagation: A multi-instrument study. Advances in Space Research. 2019;63(1):239–256. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.07.016>
5. Chernogor LF., Garmash KP., Guo Q., Zheng Y. Effects of the Strong Ionospheric Storm of August 26, 2018: Results of Multipath Radiophysical Monitoring. Geomagnetism and Aeronomy. 2021;61(1):73–91. <https://doi.org/10.1134/S001679322006002X>
6. Chernogor LF., Garmash KP., Guo Q., Luo Y., Rozumenko VT., Zheng Y. Ionospheric storm effects over the People's Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding. Advances in Space Research. 2020;66(2):226–242. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.037>
7. Guo Q., Chernogor LF. Polar Communications. In book: Cui W., Fu S., Hu Z. (eds) Encyclopedia of Ocean Engineering. Springer, Singapore, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6963-5_112-1
8. Freeman JW. Storms in Space. Cambridge University Press, London, New York, 2001.
9. Space Weather (Geophysical Monograph). In ed. Song P., Singer H., Siscoe G. Union, Washington D.C., 2001. ISBN 0-87590-984-1.
10. Benestad RE. Solar activity and Earth's climate. Springer-Praxis. 2002: 287 p.

11. Carlowicz MJ., Lopez RE. Storms from the Sun. – Joseph Henry Press, Washington DC, 2002. ISBN 0-309-07642-0.
12. Lathuillère C., Menvielle M., Lilensten J., Amari T., Radicella SM. From the Sun's atmosphere to the Earth's atmosphere: an overview of scientific models available for space weather developments. *Annales Geophys.* 2002;20(7):1081–1104.
13. Vladimirovsky BM., Temuryants NA., Martynuk VS. Cosmic Weather and our life. Fryazino, 2004; 224 p. [in Russian].
14. Bothmer V., Daglis I. Space Weather: Physics and Effects. Springer-Verlag New York, 2006. ISBN 3-642-06289-X.
15. Lilensten J., Bornarel J. Space Weather. Environment and Societies. Springer, 2006. ISBN 978-1-4020-4331-4.
16. Chernogor LF., Domnin IF. Physics of Geospace Storms: monograph. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ., 2014;408 p. (Russian).
17. Danilov AD., Morozova LD. Ionospheric storms in the F2 region. Morphology and physics (review). *Geomagnetism and Aeronomy.* 1985;25(5):705–721 (Russian).
18. Prölss GW. Ionospheric F-region storms. *Handbook of atmospheric electrodynamics* 2, 1995;(2):195–248.
19. Buonsanto M. Ionospheric storms – A review. *Space Science Reviews.* 1999;88(3–4):563–601. <https://doi.org/10.1023/A:1005107532631>
20. Danilov AD., Lastovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. *Int. J. Geomag. Aeron.* 2001;2(3):209–224. <http://ijga.agu.org/v02/gai99312/gai99312.htm>
21. Danilov AD. F-region influence on geomagnetic disturbances – A Review. *Heliogeophysical research.* 2013;5:1–33 (Russian). <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=189>
22. Blanch E., Altadill D., Boška J., Burešová D., Hernández-Pajares M. November 2003 event: Effects on the Earth's ionosphere observed from ground-based ionosonde and GPS data. In: *Annales Geophys.* 2005;23:3027–3034. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-3027-2005>
23. Pirog OM., Polekh NM., Zhrebtsov GA., Smirnov VF., Shi J., Wang X. Seasonal variations of the ionospheric effects of geomagnetic storms at different latitudes of East Asia. *Adv. Space Res.* 2006;37(5):1075–1080. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.02.007>
24. Liu J., Wang W., Burns A., Yue X., Zhang S., Zhang Y., Huang C. Profiles of ionospheric storm-enhanced density during the 17 March 2015 great storm. *J. Geophys. Res.* 2016;121(1):727–744. <https://doi.org/10.1002/2015JA021832>
25. Polekh N., Zolotukhina N., Kurkin V., Zhrebtsov G., Shi J., Wang G., Wang Z. Dynamics of ionospheric disturbances during the 17–19 March 2015 geomagnetic storm over East Asia. *Advances in Space Research.* 2017;60(11):2464–2476. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.030>
26. Borries C., Berdermann J., Jakowski N., Wilken V. Ionospheric storms – A challenge for empirical forecast of the total electron content. *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* 2015;120(4):3175–3186. <https://doi.org/10.1002/2015JA020988>
27. Katsko SV., Emelyanov LYa., Chernogor LF. Features of the ionosphere storm on December 21–24, 2016. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2021;37(2):57–74 (Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.02.057>
28. Matsushita S. A study of the morphology of ionospheric storms. *Journal of Geophysical Research.* 1959;64(3):305–321. <https://doi.org/10.1029/JZ064i003p00305>
29. Vijaya Lekshmi D., Balan N., Tulasi Ram S., Liu JY. Statistics of geomagnetic storms and ionospheric storms at low and mid latitudes in two solar cycles. *J. Geophys. Res.* 2011;116(A11328). <http://dx.doi.org/10.1029/2011JA017042>
30. Willis DM., Stevens PR., Crothers SR. Statistics of the largest geomagnetic storms per solar cycle (1844 – 1993). *Ann. Geophys.* 1997;15(6):719–728. <https://doi.org/10.1007/s00585-997-0719-5>
31. Yakovchouk OS., Mursula K., Holappa L., Veselovsky IS., Karinen A. Average properties of geomagnetic storms in 1932–2009. *J. Geophys. Res.* 2012 Mar;117(A3). <https://doi.org/10.1029/2011JA017093>
32. Chernogor LF. Physics of geospace storms. *Space Science and Technology.* 2021;27(1(128)):3–77 (Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003>