

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-36-03>

УДК 551.5:539.104(078)

**Л. Ф. ЧОРНОГОР**, д-р фіз.-мат. наук, професор  
e-mail: [Leonid.F.Chernogor@gmail.com](mailto:Leonid.F.Chernogor@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

**К. П. ГАРМАШ**, канд. фіз.-мат. наук, п.н.с.  
e-mail: [garmash@karazin.ua](mailto:garmash@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0844-5456>

**С. Г. ЛЕУС**, н.с.  
e-mail: [leusstas53@gmail.com](mailto:leusstas53@gmail.com)

**Y. LUO**, аспірант, м.н.с.  
e-mail: [yyiangluo@163.com](mailto:yyiangluo@163.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3376-5814>

**В. А. ПОДНОС**, канд. фіз.-мат. наук, с.н.с.  
e-mail: [podnos@karazin.ua](mailto:podnos@karazin.ua)

**А. М. ЦИМБАЛ**, канд. фіз.-мат. наук, доцент  
e-mail: [a.tsymbal@karazin.ua](mailto:a.tsymbal@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5274-8876>

**М. Б. ШЕВЕЛЕВ**, аспірант, м.н.с.  
e-mail: [mykyta.b.shevelev@gmail.com](mailto:mykyta.b.shevelev@gmail.com)

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

## СПЕКТРАЛЬНИЙ СКЛАД ФЛУКТУАЦІЙ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ВПРОДОВЖ ГЕОКОСМІЧНИХ БУР 21–23 БЕРЕЗНЯ 2017 р.

**Актуальність.** Магнітні бурі вивчаються давно. Особлива увага приділяється унікальним бурям, число яких 1–3 у циклі сонячної активності. Число помірних бур набагато більше. Встановлено, що магнітні бурі відрізняються великою різноманітністю. Кожна буря по-своєму індивідуальна. Тому представляє інтерес детальне вивчення будь-якої магнітної бурі.

**Мета** цієї роботи – виклад результатів спектрального аналізу флуктуацій геомагнітного поля протягом геокоосмічної бурі 21–23 березня 2017 р. та у сусідні дні.

**Методи і методологія.** Для аналізу рівня флуктуацій горизонтальних  $H$  і  $D$  компонент геомагнітного поля в діапазоні періодів 1–1000 с використовувалася база даних вимірювань, проведених у Магнітометричній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна (географічні координати: 49°38' пн.ш., 36°56' сх.д.) за допомогою магнітометра-флюксметра. Часові варіації  $H(t)$  і  $D(t)$  піддавалися системному спектральному аналізу, що базується на взаємодоповнюючих віконному перетворенні Фур'є, адаптивному перетворенні Фур'є (АПФ) та вейвлет перетворенні. АПФ має кращу роздільну здатність за періодом.

**Результати.** Проведено системний спектральний аналіз флуктуацій рівня горизонтальних компонент геомагнітного поля в діапазоні періодів 1–1000 с, а також окремо для трьох піддіапазонів: 1–50 с, 50–200 с та 200–1000 с. Найбільшу інтенсивність мали складові у піддіапазоні 200–1000 с. У контрольні дні рівень флуктуацій зазвичай не перевищував  $\pm(0.2-0.5)$  нТл. Під час магнітних бур він збільшувався до  $\pm(4-6)$  нТл для першої бурі та до  $\pm 2$  нТл для другої бурі. Протягом раптового початку першої бурі період переважаючого в спектрі коливання був близький до 350 і 600 с. Протягом головної фази магнітних бур період переважаючого в спектрі коливання становив 800–900 с. Протягом фази відновлення магнітних бур рівень флуктуацій геомагнітного поля зазвичай не перевищував  $\pm(1-2)$  нТл, а період переважаючого коливання – 700–900 с. Рух ранкового та вечірнього сонячного термінатора супроводжувався збільшенням рівня флуктуацій геомагнітного поля.

**Висновки.** Установлено параметри часових варіацій спектральних складових геомагнітного поля під час помірної магнітної бурі.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** магнітна буря, геомагнітне поле, спектральні складові, часові варіації

**Як цитувати:** Чорногор ЛФ, Гармаш КП, Леус СГ, Луо Y, Поднос ВА, Цимбал АМ, Шевелев МБ. Спектральний склад флуктуацій геомагнітного поля впродовж геокоосмічних бур 21–23 березня 2017 р. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2022;36:30-48. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-36-03>

**In cites:** Chernogor LF, Garmash KP, Leus SG, Luo Y, Podnos VA, Tsymbal AM, Shevelev MB. Spectral content of fluctuations in the geomagnetic field during the course of March 21–23, 2017 geospace storms. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series “Radio Physics and Electronics”. 2022;36:30-48. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-36-03> (In Ukrainian)

## ВСТУП

Спалахи на Сонці, викиди корональної маси та генерація високошвидкісних потоків призводить до збурення підсистем у системі Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля, до виникнення геокосмічних бур [1, 2]. Однією з ланок геокосмічної бурі є збурення магнітного поля Землі, магнітна буря (МБ).

Магнітні бурі вивчаються давно. До нових робіт відносяться, наприклад, [3–58]. Особлива увага приділяється унікальним бурям, число яких 1–3 у циклі сонячної активності. Число помірних бур набагато більше. Встановлено, що МБ відрізняються великою різноманітністю. Кожна буря по-своєму індивідуальна. Тому представляє інтерес детальне вивчення будь-якої МБ.

Однією з МБ у 24-му циклі сонячної активності була буря 21–23 березня 2017 р. Їй присвячені лише окремі роботи [3–5]. У [3, 4] обговорюються іоносферні ефекти, а в роботі [5] як іоносферні, так частково і геомагнітні ефекти. Так, встановлено, що під час бурі рівень флуктуацій збільшувався від  $\pm 0.5$  до  $\pm 5$  нТл. Найбільшу амплітуду мали складові у діапазоні періодів  $\sim 200$ – $1000$  с. Важливим є більш детальне дослідження часових варіацій флуктуацій геомагнітного поля протягом бурі 21–23 березня 2017 р., а також у сусідні дні.

Мета цієї роботи – виклад результатів спектрального аналізу флуктуацій геомагнітного поля протягом геокосмічної бурі 21–23 березня 2017 р. та у сусідні дні.

## СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Стан космічної погоди описано в роботах [3–5]. Тут зупинимося лише на наступному.

З табл. 1 можна бачити, що 20 березня 2017 р. магнітне поле було спокійним: значення індекса  $K_p$  не перевищувало 1–, значення  $D_{st}$ -індекса – 8 нТл, а його мінімальне значення досягло –4 нТл. 21 березня 2017 р. почалась МБ і  $K_{pmax} = 5+$ ,  $D_{stmin} = -24$  нТл,  $D_{stmax} = 21$  нТл. Магнітне поле залишалось збуреним 22 та частково 23 березня 2017 р.: значення індекса  $K_{pmax}$  не перевищували 4+, індекса  $D_{stmax}$  – 6 нТл, а  $D_{stmin}$  опускалося до –38 нТл. 24, 25 і 26 залишалось слабо збуреним: значення індекса  $K_{pmax} = 2+$ ,  $D_{stmin} = -12$  нТл,  $D_{stmax} = 15$  нТл.

Значення індекса  $F10.7$  змінювалися незначно: від 70.5 до 76.8, а числа Вольфа – від 0 до 18.

## ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

Для аналізу рівня флуктуацій горизонтальних  $H$  і  $D$  компонент геомагнітного поля в діапазоні періодів 1–1000 с використовувалася база даних вимірювань, проведених у Магнітометричній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна (географічні координати:  $49^{\circ}38'$  пн.ш.,  $36^{\circ}56'$  сх.д.) за допомогою магнітометра-флюксметра.

Програмно-апаратний вимірювальний комплекс описаний у роботі [59].

Часові варіації  $H(t)$  і  $D(t)$  піддавалися системному спектральному аналізу, що базується на взаємодоповнюючих віконному перетворенні Фур'є, адаптивному перетворенні Фур'є (АПФ) та вейвлет-перетворенні [60]. АПФ має кращу роздільну здатність за періодом. Саме його результати будуть описані далі.

## ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО МАГНІТНІ БУРИ

Магнітна буря була двофазною (рекурентною). Раптовий початок першої бурі розпочався близько 00:00 (тут і далі час UT) і тривав приблизно до 12:00 21 березня 2017 р. При цьому значення  $K_{pmax} = 4$ ,  $D_{stmax} = 21$  нТл. Головна фаза відмічалася з 12:00 до 18:00 21 березня 2017 р. При цьому  $K_{pmax} = 5-$ ,  $D_{stmin} = -22$  нТл. Далі настала фаза відновлення, яка тривала приблизно до 20:00 22 березня 2017 р., після чого розпочалася друга МБ. Її головна фаза була нетривалою: від 20:00 до 23:00 22 березня 2017 р. При цьому  $K_{pmax} = 4+$ ,  $D_{stmin} = -31$  нТл. Фаза відновлення тривала з 23:00 22 березня 2017 р. до 12:00 23 березня 2017 р. Далі магнітне поле було більш-менш спокійним ( $K_p = 1-2$ ,  $D_{st} \approx (-11)$ – $(+6)$  нТл).

Таблиця 1. Відомості про стан космічної погоди  
Table 1. Space Weather State General Data

Дата	$K_p$	$D_{st}$		$F10.7$	$W$
		min	max		
20.03.2017	0+ 0 0+ 0+ 0 1- 0+ 0	-4	8	72.1	0
21.03.2017	1 3+ 4 2+ 3 5- 5+ 4	-24	21	70.5	13
22.03.2017	4 4- 3- 3+ 4- 4 4+ 4+	-31	-11	72.0	14
23.03.2017	4 3+ 2 2- 1 2 1- 1-	-38	6	71.5	14
24.03.2017	2 2+ 1+ 1- 2- 2- 1- 0+	-10	6	71.9	14
25.03.2017	0 1+ 0+ 1- 1- 1 0+ 1	-12	0	73.7	18
26.03.2017	2- 0 0+ 1- 1 1 0 1+	-12	15	76.8	31

### РЕЗУЛЬТАТИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Часові варіації рівня  $H$  и  $D$  компонент, результати АПФ та енергограми (розподіл енергії за періодами) для контрольних днів і днів з МБ наведено на Рис. 1–7.

20 березня 2017 р. Рівень обох компонент у контрольний день здебільшого флуктував у межах  $\pm(0.2-0.5)$  нТл, лише зрідка досягаючи значення 1 нТл (див. Рис. 1). Протягом сходу та заходу Сонця та поблизу цих подій рівень збільшувався до  $\pm(1-1.2)$  нТл.

Рівень та основні періоди у флуктуаціях геомагнітного поля наведено у табл. 2. З табл. 2 видно, що було кілька груп періодів: близько 35–40, 90, 120–380, 350–460 та 650–820 с.

21 березня 2017 р. Раптовий початок першої МБ супроводжувався збільшенням рівня флуктуацій від  $\pm(1-2)$  до  $\pm(4-6)$  нТл (див. Рис. 2). Якщо до початку МБ у спектрі переважали періоди  $T \approx 650-850$  с, то при раптовому початку стали переважаючими періоди близько 350 і 600 с.

На самому початку головної фази МБ найбільшу енергію мали складові з  $T \approx 800-900$  с. У період заходу Сонця рівень флуктуацій збільшувався до  $\pm(4-5)$  нТл, а  $T \approx 400-600$  с.

На початку фази відновлення рівень флуктуацій зменшився до  $\sim 2$  нТл, а  $T \approx 700-900$  с.

22 березня 2017 р. Приблизно з 00:00 до 17:00 рівень флуктуацій найчастіше знаходився в межах  $\pm(1-2)$  нТл, лише зрідка досягаючи рівня  $\pm(4-5)$  нТл (див. Рис. 3). Протягом головної фази другої МБ рівень збільшився від  $\pm(0.5-1)$  до  $\pm(1.5-2)$  нТл в інтервалах часу від 20:00 до 21:00 для  $H$ -компоненти та від 17:30 до 22:00 для  $D$ -компоненти. При цьому  $T \approx 800-900$  с.

23 березня 2017 р. Приблизно з 00:00 до 12:00 мала місце фаза відновлення (див. Рис. 4). Рівень флуктуацій був близьким до 1 нТл, лише поблизу сходу та заходу Сонця він збільшувався до  $\pm(1-2)$  нТл. Переважали періоди 700–800 с.

24 березня 2017 р. Цей день належить до контрольних. Рівень флуктуацій за рідкісним винятком не перевищував  $\pm(0.5-1)$  нТл (див. Рис. 5). Він збільшувався поблизу сходу та заходу Сонця до  $\pm(1.5-2)$  нТл. У спектрі переважаючими періодами були  $T \approx 500-900$  с.

25 березня 2017 р. Цей день був також магнітоспокойним. Рівень флуктуацій зазвичай не перевищував  $\pm(0.3-0.5)$  нТл (див. Рис. 6). Певне збільшення спостерігалось поблизу сходу та заходу Сонця. Переважали періоди 600–700 с.

26 березня 2017 р. Цей день також розглядався як контрольний. Рівень флуктуацій, як правило, знаходився у межах  $\pm(0.4-0.5)$  нТл (див. Рис. 7). Епізодично він збільшувався до  $\pm(0.6-1)$  нТл. Як і в інші дні, поблизу сходу та заходу Сонця відмічалось збільшення приблизно вдвічі рівня флуктуацій геомагнітного поля. Період переважаючих за енергією складових змінювався в широких межах: від  $\sim 500$  до  $\sim 900$  с.

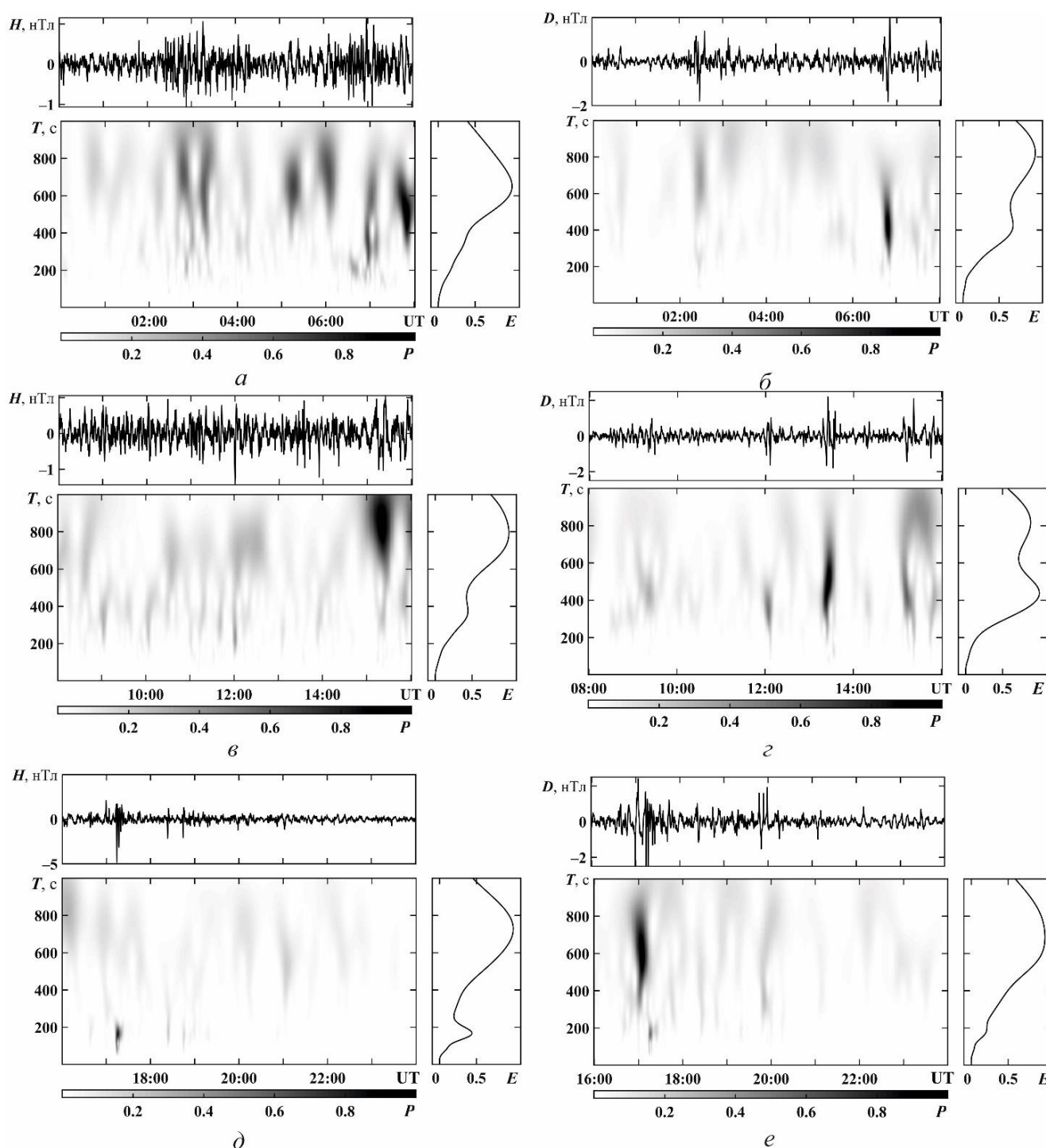


Рис. 1. Добові варіації рівня флуктуацій горизонтальних компонент геомагнітного поля (верхня панель) та результати адаптивного перетворення Фур'є (нижня панель) 20 березня 2017 р. в інтервалах часу:  $a, \bar{b}$  – 00:00–08:00 UT;  $\bar{c}, \bar{e}$  – 08:00–16:00 UT;  $\bar{d}, \bar{e}$  – 16:00–24:00 UT.

Праворуч показано енергограми – розподіл енергії за періодами  
 Fig. 1. Daily variations of the fluctuations level of a geomagnetic field horizontal component (top panel) and adaptive Fourier transform results (low panel) for March 20, 2017 at the time interval:  $a, \bar{b}$  – 00:00–08:00 UT;  $\bar{c}, \bar{e}$  – 08:00–16:00 UT;  $\bar{d}, \bar{e}$  – 16:00–24:00 UT. Energygrams (energy distribution by periods) are shown at right panel

Таблиця 2. Рівень і головні періоди коливань у флуктуаціях геомагнітного поля під час бур  
 Table 2, The level and a main period oscillations at the fluctuations of geomagnetic field during storms

Дата	Час, UT	<i>D</i> -компонента		<i>H</i> -компонента	
		Рівень, нТл	Період, с	Рівень, нТл	Період, с
20 березня 2017 р.	00:00–12:00	0.3–0.6	42±5 90±20; 120±25 420±100; 820±100		
	00:00–12:00				
21 березня 2017 р.	03:00–21:00	2–5	35±5 165±25 350±50; 700±100		
	03:00–15:00				
22 березня 2017 р.	00:00–12:00	2–4	42.5±5 180±25 830±100		
	00:00–12:00				
23 березня 2017 р.	00:00–12:00	1–2.5	42.5±5 160±25 460±25; 750±100		
	08:00–18:00				
24 березня 2017 р.	00:00–12:00	1–1.5	42.5±5 70±15; 75±25 350±50; 840±100		
	00:00–12:00				
25 березня 2017 р.	11:00–20:00	0.5–1.5	42.5±5 175±25 700±100		
	00:00–12:00				
26 березня 2017 р.	09:00–16:00	0.5–1.5	42.5±5 100±20; 160±25 480±100		
	06:00–18:00				

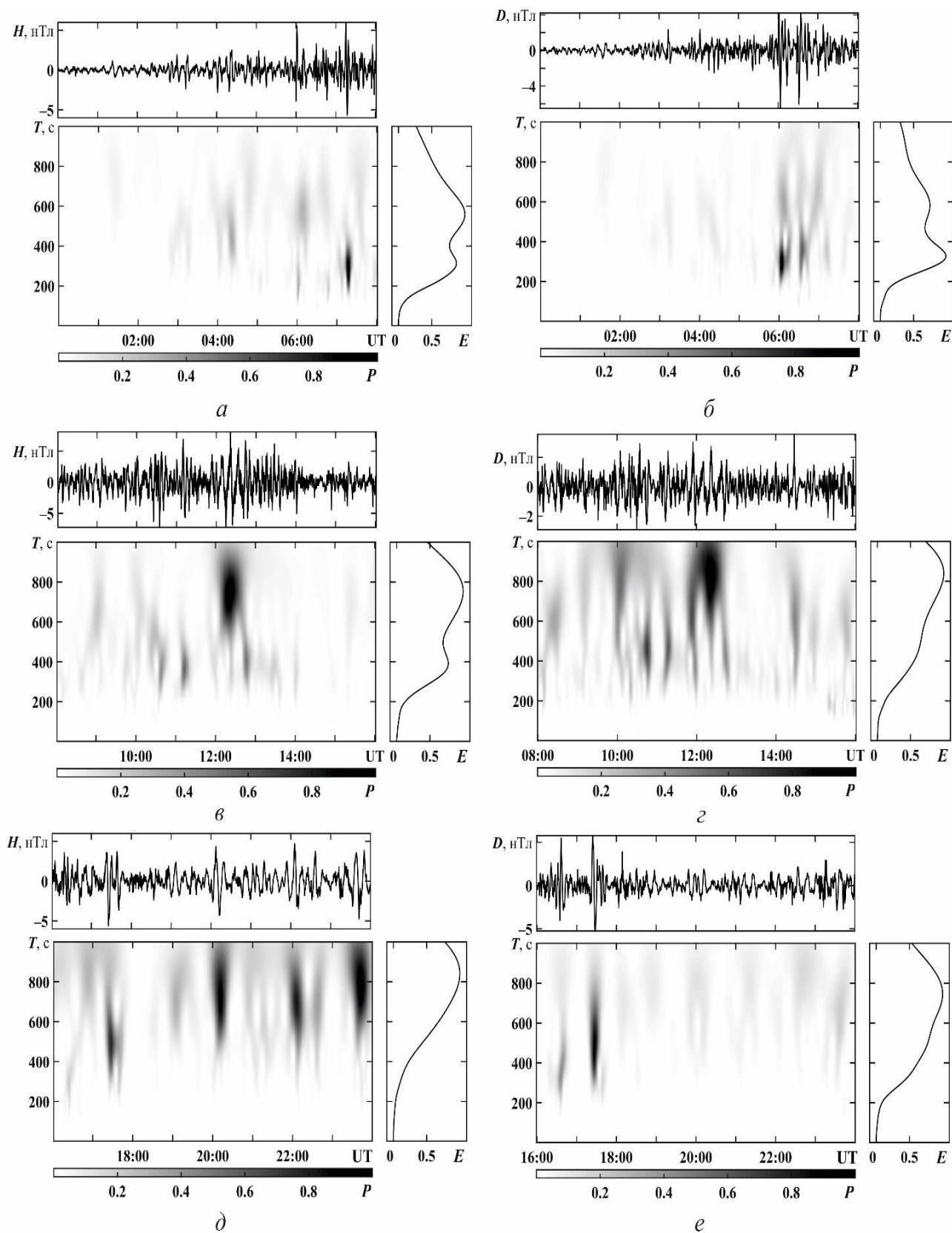


Рис. 2. Те саме, що й на рис. 1, для 21 березня 2017 р.

Fig. 2. The same as in Fig. 1, for March 21, 2017



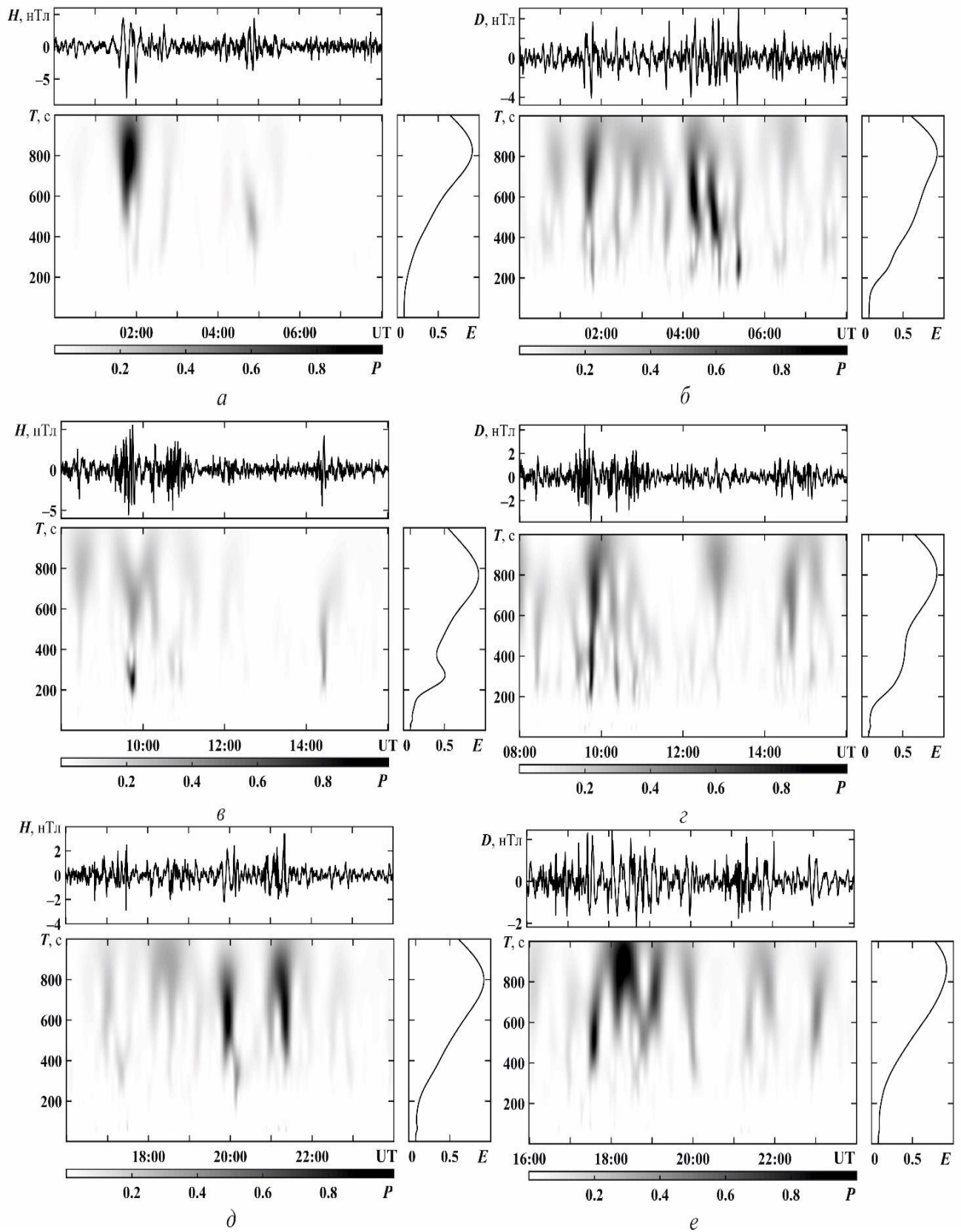


Рис. 3. Те саме, що й на рис. 1, для 22 березня 2017 р.

Fig. 3. The same as in Fig. 1, for March 22, 2017

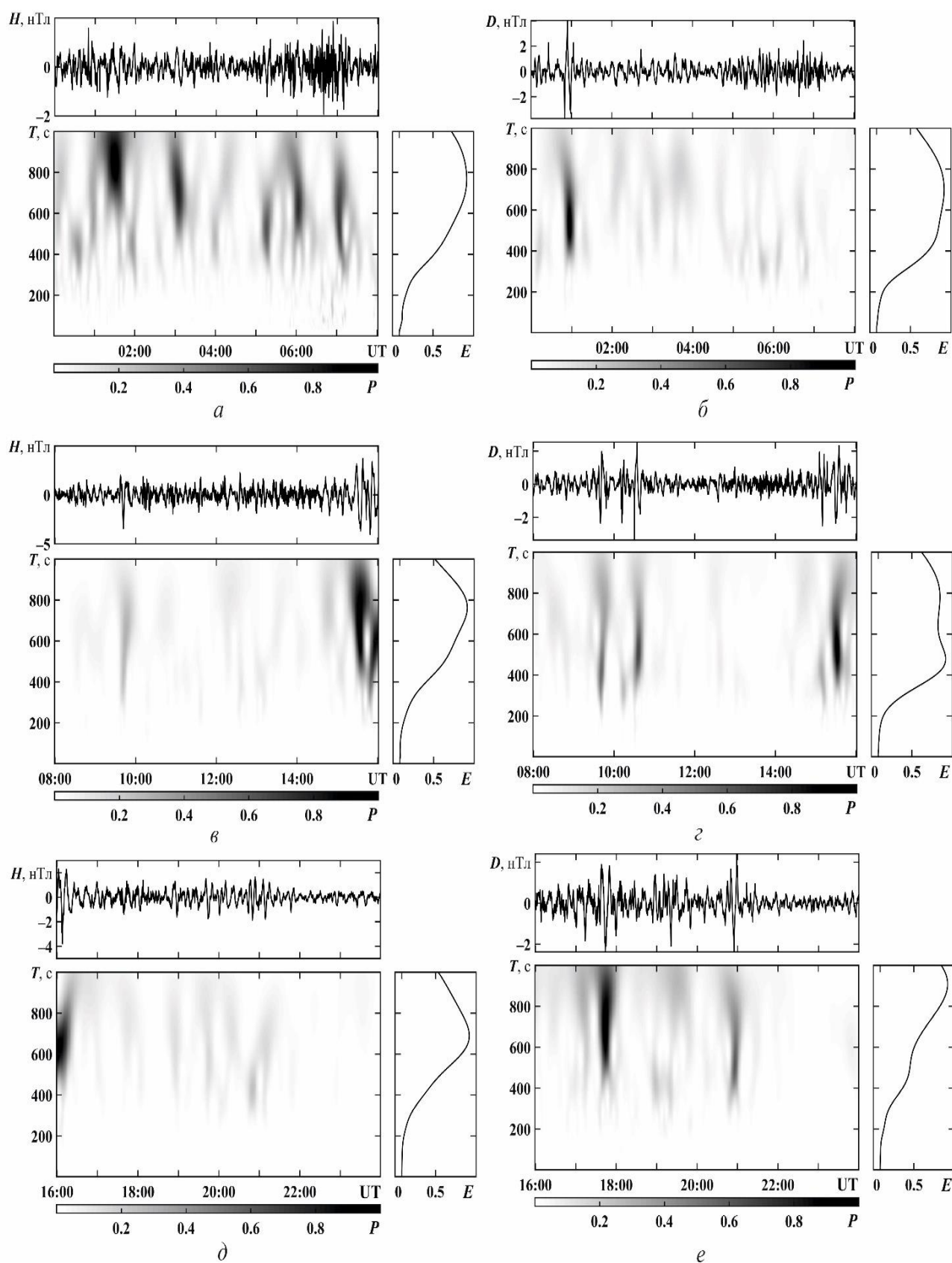


Рис. 4. Те саме, що й на рис. 1, для 23 березня 2017 р.

Fig. 4. The same as in Fig. 1, for March 23, 2017



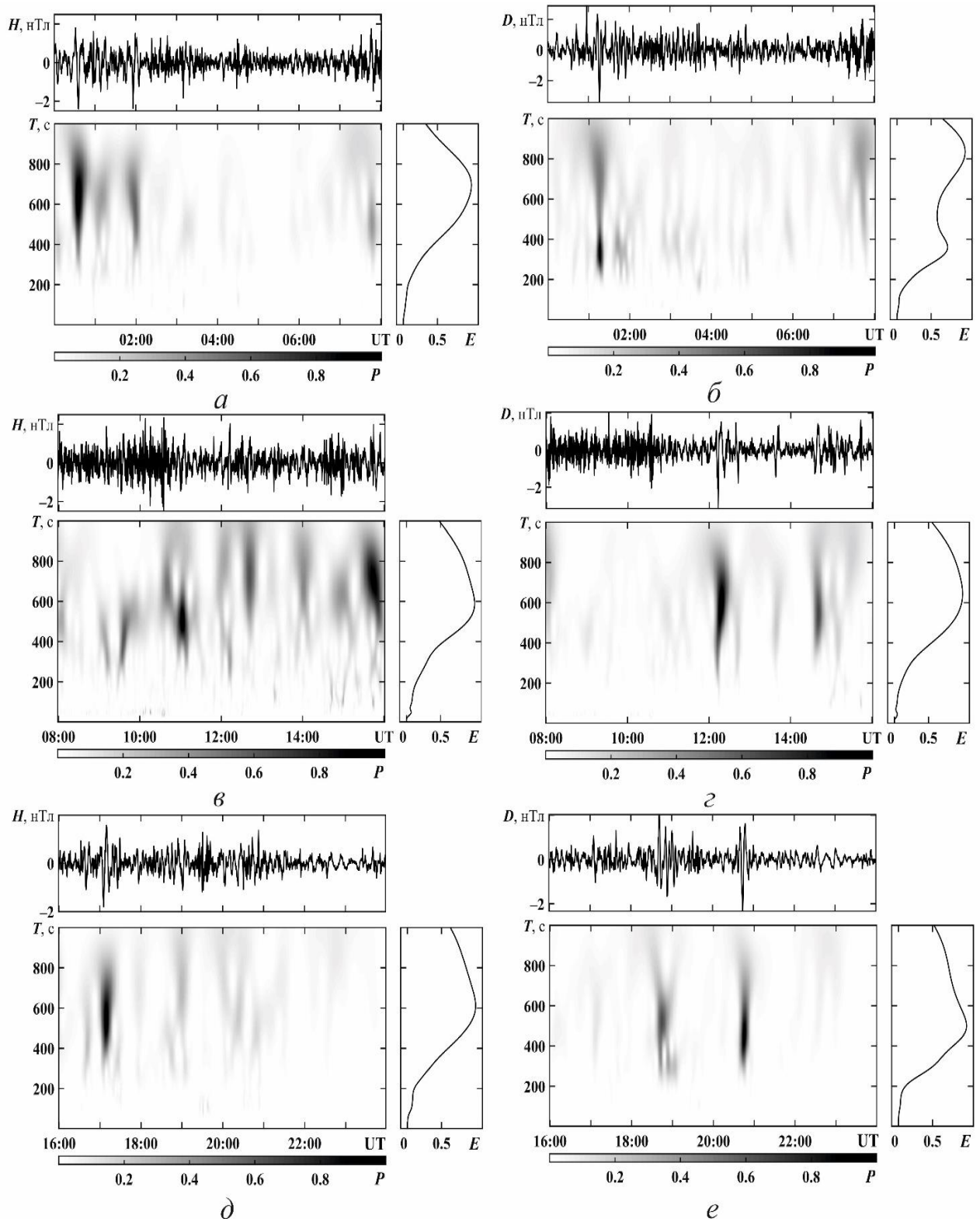


Рис. 5. Те саме, що й на рис. 1, для 24 березня 2017 р.

Fig. 5. The same as in Fig. 1, for March 24, 2017

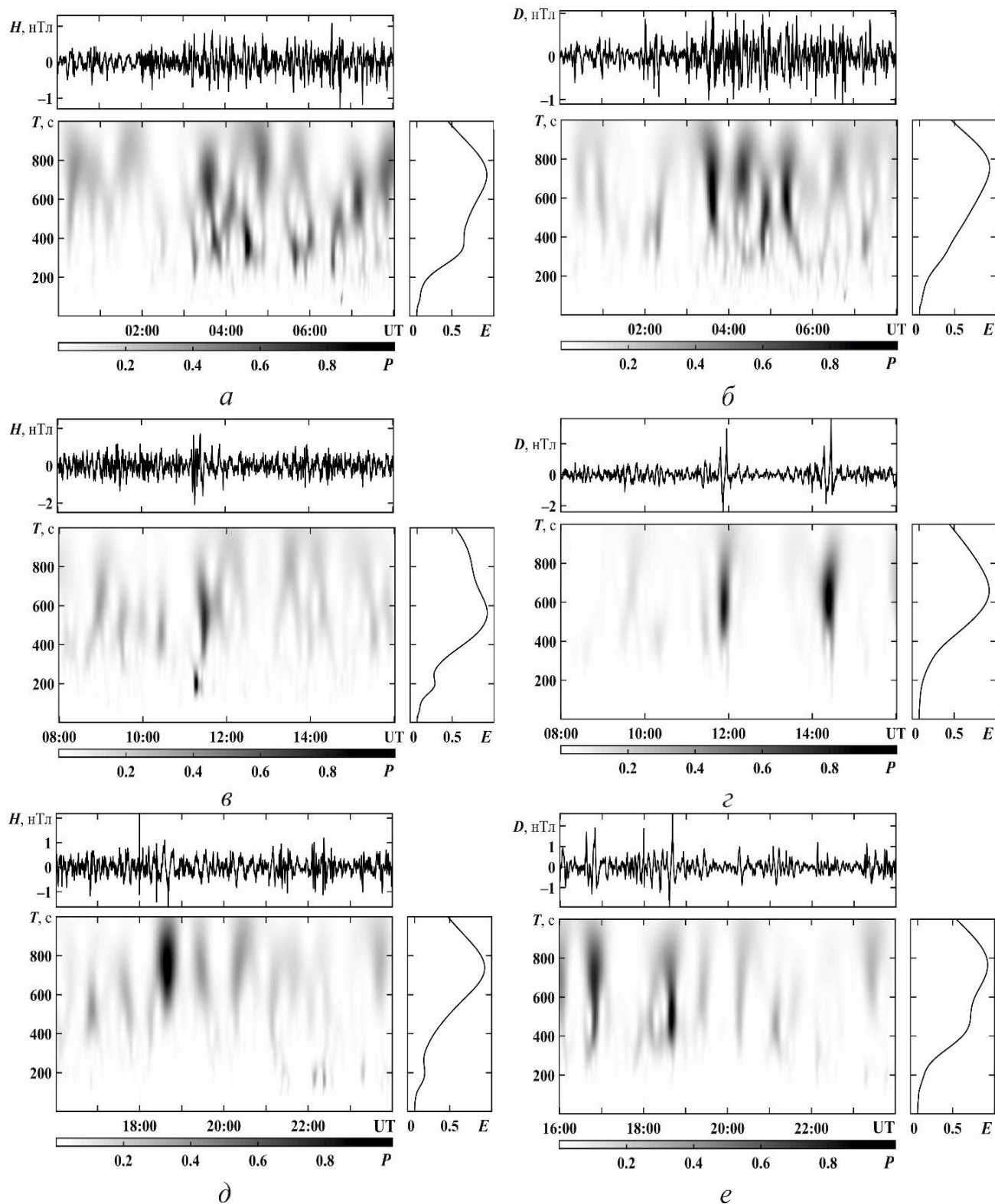


Рис. 6. Те саме, що й на рис. 1, для 25 березня 2017 р.

Fig. 6. The same as in Fig. 1, for March 25, 2017

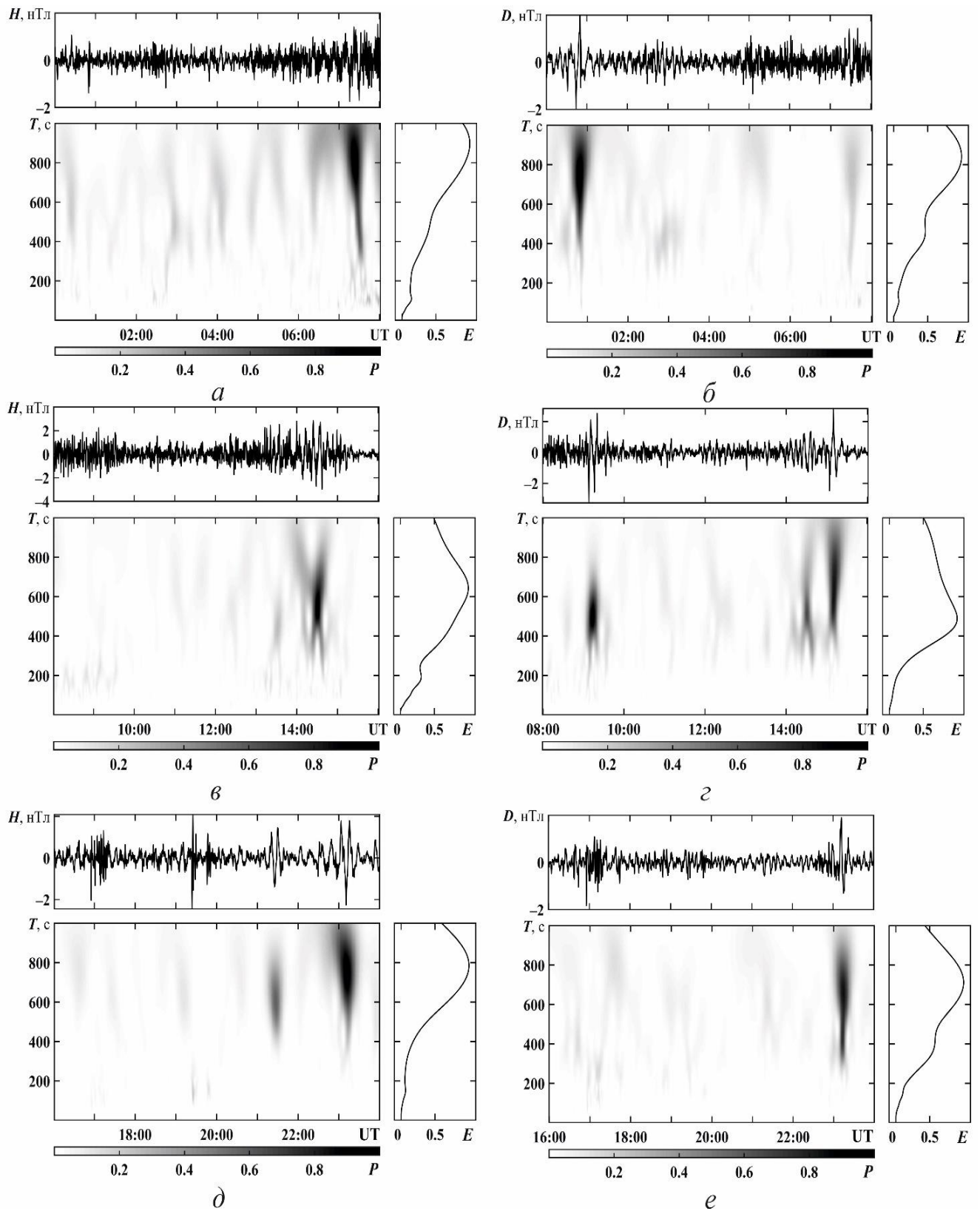


Рис. 7. Те саме, що й на рис. 1, для 26 березня 2017 р.

Fig. 7. The same as in Fig. 1, for March 26, 2017

### ОБГОВОРЕННЯ

У роботі [5] оцінено енергію та потужність першої та другої магнітних бур. Енергії виявилися рівними 1.8 і 1.44 ПДж, а потужності – 71 і 67 ГВт. Згідно з класифікацією [1, 2], перша буря відноситься до помірних, а друга – до вельми помірних. Обидві бурі супроводжувалися збільшенням приблизно на порядок рівня флуктуацій геомагнітного поля (від  $\pm(0.2-0.5)$  до  $\pm(4-6)$  нТл для першої бурі та до  $\pm 2$  нТл для другої бурі). Істотно змінювався спектральний склад флуктуацій. Протягом головної фази обох бур період переважаючих коливань становив 800–900 с. При раптовому початку першої бурі цей період був близько 350 і 600 с.

Протягом фази відновлення МБ рівень флуктуацій не перевищував  $\pm(1-2)$  нТл, а період переважаючих коливань становив близько 700–900 с.

Зазначимо, що поблизу сходу та заходу Сонця, як правило, відмічалось збільшення рівня флуктуацій до  $\pm 1$  нТл у контрольні дні та до  $\pm(4-5)$  нТл протягом бурі. Ефект сонячного термінатора у геомагнітному полі детально описаний у роботі [61]. Мабуть, позначалася синергетична взаємодія двох високоенергетичних джерел – сонячного термінатора та магнітної бурі.

### ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Проведено системний спектральний аналіз флуктуацій рівня горизонтальних компонент геомагнітного поля в діапазоні періодів 1–1000 с, а також окремо для трьох піддіапазонів: 1–50 с, 50–200 с та 200–1000 с.

2. Найбільшу інтенсивність мали складові у піддіапазоні 200–1000 с.

3. У контрольні дні рівень флуктуацій зазвичай не перевищував  $\pm(0.2-0.5)$  нТл. Під час МБ він збільшувався до  $\pm(4-6)$  нТл для першої бурі та до  $\pm 2$  нТл для другої бурі.

4. Протягом раптового початку першої бурі період переважаючого в спектрі коливання був близький до 350 і 600 с.

5. Протягом головної фази МБ період переважаючого в спектрі коливання становив 800–900 с.

6. Протягом фази відновлення МБ рівень флуктуацій геомагнітного поля зазвичай не перевищував  $\pm(1-2)$  нТл, а період переважаючого коливання – 700–900 с.

7. Рух ранкового та вечірнього сонячного термінатора супроводжувався збільшенням рівня флуктуацій геомагнітного поля.

### ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт 2020.02/0015 “Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля – атмосфера – іоносфера”. Роботу також частково підтримано в рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0121U109881 та 0121U109882).

### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Черногор ЛФ, Домнин ИФ. Физика геокосмических бурь: Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, 2014. 408 с.
2. Черногор Л Ф. Фізика геокосмічних бур. Космічна наука і технологія. 2021;27(1(128)):3-77.
3. Емельянов ЛЯ, Кацко СВ, Черногор ЛФ. Ионосферные эффекты геокосмических бурь 21–24 декабря 2016 г. и 21–23 марта 2017 г. Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Радіофізика та іоносфера. 2019;25(1350):78-85.
4. Katsko SV, Emelyanov LY, Chernogor LF. Ionosphere response to space weather events on 21–23 March 2017 in the central region of Europe. 2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS). 2021:01-04. <https://doi.org/10.23919/URSIGASS51995.2021.9560587>
5. Luo Y, Черногор ЛФ, Гармаш КП. Магніто-іоносферні ефекти геокосмічної бурі 21–23 березня 2017 р. Кінематика і фізика небесних тіл. 2022;38(2):3-22.
6. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Zheng Y. Effects of the Strong Ionospheric Storm of August 26, 2018: Results of Multipath Radiophysical Monitoring. Geomag. Aeron. 2021;61(1):73–91. <https://doi.org/10.1134/S001679322006002X>
7. Черногор ЛФ, Шевелев НБ. Широтная зависимость квазипериодических вариаций геомагнитного поля в течение сильнейшей геокосмической бури 7–9 сентября 2017 года. Космічна наука і технологія. 2020;26(2):72-83.



8. Черногор ЛФ. Статистичні характеристики геомагнітних бур у 24-ому циклі сонячної активності. Кінематика і фізика небесних тіл. 2021;37(4):49-59. <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.04.049>
9. Черногор ЛФ, Голуб МЮ, Luo Y. Статистика геомагнітних бур протягом циклу сонячної активності (2009–2020 рр.). Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2020;33:69-77. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-06>
10. Blagoveshchensky DV, Sergeeva MA. Impact of geomagnetic storm of September 7–8, 2017 on ionosphere and HF propagation: A multi-instrument study. Adv. Space Res. 2019;63(1):239-256. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.07.016>
11. Blagoveshchensky DV, Zhbakov GA, Maltseva OA. Observed and Calculated Ionograms of Oblique Ionospheric Sounding on HF Radio Paths During a Magnetic Storm of September 7–8, 2017. Radiophysics and Quantum Electronics. 2019;61(12):881-892. <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09944-3>
12. Bolaji OS, Fashae JB, Adebisi SJ, Owolabi C, Adebisin BO, Kaka RO, Ibanga J, Abass M, Akinola OO, Adekoya BJ, Younas W. Storm Time Effects on Latitudinal Distribution of Ionospheric TEC in the American and Asian-Australian Sectors: August 25–26, 2018 Geomagnetic Storm. J. Geophys. Res. 2021;126(8). id. e2020JA029068. <https://doi.org/10.1029/2020JA029068>
13. 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. Adv. Space Res. 2020;66(2):226-242. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.037>
14. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Zheng Y. Radio Wave Characteristics Distorted During Geospace Storm: Results of Multi-Frequency Multiple Path Oblique Sounding of Ionosphere. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). Lviv, Ukraine, August 26-28. 2021:151-156. <https://doi.org/10.1109/UKRCON53503.2021.9576010>
15. Chernogor LF, Zheng Y, Guo Q, Luo Y, Garmash KP, Rozumenko VT. Features of Ionospheric and Magnetic Effects of August 5–6, 2019 Noticeable Geospace Storm Over China and Ukraine. Problems of Geocosmos – 2020. Chapter 28. Springer Nature Switzerland AG. 2022:379-396.
16. D'Angelo G, Piersanti M, Alfonsi L, Spogli L, Clausen LBN, Coco I, Li G, Baiqi N. The response of high latitude ionosphere to the 2015 St. Patrick's day storm from in situ and ground based observations. Adv. Space Res. 2018;62(3):638-650. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.05.005>
17. Despirak IV, Kleimenova NG, Gromova LI, Gromov SV, Malysheva LM. Supersubstorms during Storms of September 7–8, 2017. Geomagn. Aeron. 2020;60(3):292-300. <https://doi.org/10.1134/S0016793220030044>
18. Dmitriev AV, Suvorova AV, Klimenko MV, Klimenko VV, Ratovsky KG, Rakhmatulin RA, Parkhomov VA. Predictable and unpredictable ionospheric disturbances during St. Patrick's Day magnetic storms of 2013 and 2015 and on 8–9 March 2008. J. Geophys. Res. 2017;122(2):2398-2423. <https://doi.org/10.1002/2016JA023260>
19. Fejer BG, Navarro LA, Sazykin S, Newheart A, Milla MA, Condor P. Prompt Penetration and Substorm Effects Over Jicamarca During the September 2017 Geomagnetic Storm. J. Geophys. Res. 2021;126(8). id. e2021JA029651. <https://doi.org/10.1029/2021JA029651>
20. Feng J, Zhou Y, Zhou Y, Gao S, Zhou C, Tang Q, Liu Y. Ionospheric response to the 17 March and 22 June 2015 geomagnetic storms over Wuhan region using GNSS-based tomographic technique. Adv. Space Res. 2021;67(1):111-121. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.008>
21. Ghodpage RN, Patil PT, Gurav OB, Gurubaran S, Sharma AK. Ionospheric response to major storm of 17th March 2015 using multi-instrument data over low latitude station Kolhapur (16.8°N, 74.2°E, 10.6°dip. Lat.). Adv. Space Res. 2018;62(3):624-637. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.05.003>
22. Imtiaz N, Younas W, Khan M. Response of the low-to mid-latitude ionosphere to the geomagnetic storm of September 2017. Ann. Geophys. 2020;38(2):359-372. <https://doi.org/10.5194/angeo-38-359-2020>
23. Jiang C, Yang G, Liu J, Yokoyama T, Liu T, Lan T, Zhou C, Zhang Y, Zhao Z, Komolmis T, Supnithi P, Yatini CY. Equatorial and low-latitude ionospheric response to the 17-18 March 2015 great storm over South East Asia longitude sector. J. Geophys. Res. 2017;122(5):5756-5767. <https://doi.org/10.1002/2017JA024134>
24. Jimoh O, Lei J, Zhong J, Owolabi C, Luan X, Dou X. Topside Ionospheric Conditions During the 7–8 September 2017 Geomagnetic Storm. J. Geophys. Res. 2019;124(11):9381-9404. <https://doi.org/10.1029/2019JA026590>
25. Jin S, Jin R, Kutoglu H. Positive and Negative Ionospheric Responses to the March 2015 Geomagnetic Storm from BDS Observations. J. Geodes. 2017;91(6):613-626. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0988-4>
26. Jonah OF, Coster A, Zhang S, Goncharenko L, Erickson PJ, de Paula ER, Kherani EA. TID Observations and Source Analysis During the 2017 Memorial Day Weekend Geomagnetic Storm Over North America. J. Geophys. Res. 2018;123(10):8749-8765. <https://doi.org/10.1029/2018JA025367>
27. Kumar S, Kumar VV. Ionospheric Response to the St. Patrick's Day Space Weather Events in March 2012, 2013, and 2015 at Southern Low and Middle Latitudes. J. Geophys. Res. 2019;124(1):584-602. <https://doi.org/10.1029/2018JA025674>

28. Kumar VV, Parkinson ML. A Global Scale Picture of Ionospheric Peak Electron Density Changes during Geomagnetic Storms. *Space Weather*. 2017;15(4):637-652. <https://doi.org/10.1002/2016SW001573>
29. Lei J, Huang F, Chen X, Zhong J, Ren D, Wang W, Yue X, Luan X, Jia M, Dou X, Hu L, Ning B, Owolabi C, Chen J, Li G, Xue X. Was magnetic storm the only driver of the long-duration enhancements of daytime total electron content in the Asian-Australian sector between 7 and 12 September 2017? *J. Geophys. Res.* 2018;123(4):3217-3232. <https://doi.org/10.1029/2017JA025166>
30. Li S. Temporal evolution analysis of storm-enhanced density during an intense magnetic storm on March 2015. *Adv. Space Res.* 2021;67(5):1570-1579. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.12.004>
31. Lissa D, Srinivasu VKD, Prasad DSVVD, Niranjana K. Ionospheric response to the 26 August 2018 geomagnetic storm using GPS-TEC observations along 80°E and 120°E longitudes in the Asian sector. *Adv. Space Res.* 2020;66(6):1427-1440. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.025>
32. Liu G, Shen H. A severe negative response of the ionosphere to the intense geomagnetic storm on March 17, 2015 observed at mid- and low-latitude stations in the China zone. *Adv. Space Res.* 2017;59(9):2301-2312. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.02.021>
33. Liu J, Zhang D-H, Coster AJ, Zhang S-R, Ma G-Y, Hao Y-Q, Xiao Z. A case study of the large-scale traveling ionospheric disturbances in the eastern Asian sector during the 2015 St. Patrick's Day geomagnetic storm. *Ann. Geophys.* 2019;37(4):673-687. <https://doi.org/10.5194/angeo-37-673-2019>
34. Luo Y, Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Zheng Yu. Dynamic processes in the magnetic field and in the ionosphere during the 30 August 2 September, 2019 geospace storm. *Ann. Geophys.* 2021;39(4). <https://doi.org/10.5194/angeo-39-657-2021>
35. Luo Y, Guo Q, Zheng Y, Гармаш КП, Черногор ЛФ, Шульга СМ. Ефекти геокоsmічної бурі 5—6 серпня 2019 р. *Космічна наука і технологія*. 2021;27(2)(129):45-69. <https://doi.org/10.15407/knit2021.02.045>
36. Mansilla GA, Zossi MM. Longitudinal Variation of the Ionospheric Response to the 26 August 2018 Geomagnetic Storm at Equatorial/Low Latitudes. *Pure Appl. Geophys.* 2020;177(12):5833-5844. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02601-1>
37. Ngwira CM, Habarulema J-B, Astafyeva E, Yizengaw E, Jonah OF, Crowley G, Gisler A, Coffey V. Dynamic Response of Ionospheric Plasma Density to the Geomagnetic Storm of 22-23 June 2015. *J. Geophys. Res.* 2019;124(8):7123-7139. <https://doi.org/10.1029/2018JA026172>
38. Nykiel G, Zanimonskiy YM, Yampolski YuM, Figurski M. Efficient usage of dense GNSS networks in central Europe for the visualization and investigation of ionospheric TEC variations. *Sensors*. 2017;17(10). id. 2298. <https://doi.org/10.3390/s17102298>
39. Olwendo OJ, Cesaroni C, Yamazaki Y, Cilliers P. Equatorial ionospheric disturbances over the East African sector during the 2015 St. Patrick's day storm. *Adv. Space Res.* 2017;60(8):1817-1826. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.06.037>
40. Paul B, De BK, Guha A. Latitudinal variation of F-region ionospheric response during three strongest geomagnetic storms of 2015. *Acta Geodaetica et Geophysica*. 2018;53(4):579-606. <https://doi.org/10.1007/s40328-018-0221-4>
41. Piersanti M, Cesaroni C, Spogli L, Alberti T. Does TEC react to a sudden impulse as a whole? The 2015 Saint Patrick's day storm event. *Adv. Space Res.* 2017;60(8):1807-1816. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.021>
42. 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. *Adv. Space Res.* 2017;60(11):2464-2476. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.030>
43. Ray S, Roy B, Paul KS, Goswami S, Oikonomou C, Haralambous H, Chandel B, Paul A. Study of the effect of 17–18 March 2015 geomagnetic storm on the Indian longitudes using GPS and C/NOFS. *J. Geophys. Res.* 2017;122(2):2551-2563. <https://doi.org/10.1002/2016JA023127>
44. Rubtsov AV, Maletckii BM, Danilchuk EI, Smotrova EE, Shelkov AD, Yasyukevich AS. Ionospheric disturbances over eastern Siberia during April 12-15, 2016 geomagnetic storms. *Sol.-Terr. Phys.* 2020;6(1):60-68. <https://doi.org/10.12737/STP-61202007>
45. Şentürk E. Investigation of global ionospheric response of the severe geomagnetic storm on June 22–23, 2015 by GNSS-based TEC observations. *Astrophys. Space Sci.* 2020;365(7). id. 110. <https://doi.org/10.1007/s10509-020-03828-z>
46. Shpynev BG, Zolotukhina NA, Polekh NM, Ratovsky KG, Chernigovskaya MA, Belinskaya AY, Stepanov AE, Bychkov VV, Grigorieva SA, Panchenko VA, Korenkova NA, Mielich J. The ionosphere response to severe geomagnetic storm in March 2015 on the base of the data from Eurasian high-middle latitudes ionosonde chain. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018;180:93-105. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.10.014>
47. Shreedevi PR, Choudhary RK, Thampi SV, Yadav S, Pant TK, Yu Y, McGranaghan R, Thomas EG, Bhardwaj A, Sinha AK. Geomagnetic Storm-Induced Plasma Density Enhancements in the Southern Polar Ionospheric Region: A Comparative Study Using St. Patrick's Day Storms of 2013 and 2015. *Space Weather*. 2020;18(8). id. e2019SW002383. <https://doi.org/10.1029/2019SW002383>



48. Spogli L, Sabbagh D, Regi M, Cesaroni C, Perrone L, Alfonsi L, Mauro DDi, Lepidi S, Campuzano SA, Marchetti D, Santis ADe, Malagnini A, Scotto C, Cianchini G, Shen X, Piscini A, Ippolito A. Ionospheric Response Over Brazil to the August 2018 Geomagnetic Storm as Probed by CSES-01 and Swarm Satellites and by Local Ground-Based Observations. *J. Geophys. Res.* 2021;126(2). id. e2020JA028368. <https://doi.org/10.1029/2020JA028368>
49. Sun W-J, Ning B-Q, Zhao B-Q, Li G-Z, Hu L-H, Chang S-M. Analysis of ionospheric features in middle and low latitude region of China during the geomagnetic storm in March 2015. *Acta Geophysica Sinica.* 2017;60(1):1-10.
50. Uryadov VP, Vybornov FI, Pershin AV. Features of the HF Signal Propagation on Oblique Sounding Paths During Solar and Magnetic Activity in September 2017. *Radiophys. Quantum Electr.* 2019;62(2):85-98. <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09956-z>
51. Venkatesh K, Tulasi Ram S, Fagundes PR, Seemala GK, Batista IS. Electrodynamic disturbances in the Brazilian equatorial and low-latitude ionosphere on St. Patrick's Day storm of 17 March 2015. *J. Geophys. Res.* 2017;122(4):4553-4570. <https://doi.org/10.1002/2017JA024009>
52. Verkhoglyadova OP, Komjathy A, Mannucci AJ, Mlynczak MG, Hunt LA, Paxton LJ. Revisiting ionosphere-thermosphere responses to solar wind driving in superstorms of November 2003 and 2004. *J. Geophys. Res.* 2017;122(10):10,824-10,850. <https://doi.org/10.1002/2017JA024542>
53. Wang Z, Zou S, Liu L, Ren J, Aa E. Hemispheric Asymmetries in the Mid-latitude Ionosphere During the September 7–8, 2017 Storm: Multi-instrument Observations. *J. Geophys. Res.* 2021;126(4). id. e2020JA028829. <https://doi.org/10.1029/2020JA028829>
54. Xu Z., Hartinger M., Clauer C., Peek T., Behlke R. A comparison of the ground magnetic responses during the 2013 and 2015 St Patrick's Day geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2017. 122, Is. 4. P. 4023—4036. DOI: [10.1002/2016JA023338](https://doi.org/10.1002/2016JA023338)
55. Younas W, Amory-Mazaudier C, Khan M, Fleury R. Ionospheric and Magnetic Signatures of a Space Weather Event on 25–29 August 2018: CME and HSSWs. *J. Geophys. Res.* 2020;125(8). id. e2020JA027981. <https://doi.org/10.1029/2020JA027981>
56. Zakharenkova I, Cherniak I, Krankowski A. Features of Storm-Induced Ionospheric Irregularities From Ground-Based and Spaceborne GPS Observations During the 2015 St. Patrick's Day Storm. *J. Geophys. Res.* 2019;124(12):10728-10748. <https://doi.org/10.1029/2019JA026782>
57. Zhang S-R, Erickson PJ, Zhang Y, Wang W, Huang C, Coster AJ, Holt JM, Foster JF, Sulzer M, Kerr R. Observations of ion-neutral coupling associated with strong electrodynamic disturbances during the 2015 St. Patrick's Day storm. *J. Geophys. Res.* 2017;122(1):1314-1337. <https://doi.org/10.1002/2016JA023307>
58. Zolotukhina N, Polekh N, Kurkin V, Rogov D, Romanova E, Chelpanov M. Ionospheric effects of St. Patrick's storm over Asian Russia: 17–19 March 2015. *J. Geophys. Res.* 2017;122(2):2484-2504. <https://doi.org/10.1002/2016JA023180>
59. Черногор ЛФ, Гармаш КП, Поднос ВА, Тырнов ОФ. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах. Космический проект «Ионосат-Микро». К.: Академперіодика, 2013. 160-182.
60. Chernogor L. F., Advanced Methods of Spectral Analysis of Quasiperiodic Wave-Like Processes in the Ionosphere: Specific Features and Experimental Results. *Geomag. Aeron.* 2008;48(5):652–673. <https://doi.org/10.1134/S0016793208050101>
61. Черногор ЛФ. Геомагнітні пульсації, супутні до руху сонячного термінатора через магнітосопряжену область. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2012;17(1):57-67.

#### REFERENCES

1. Chernogor LF, Domnin IF. Physics of geospace storms: Monograph. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, Institute of Ionosphere NAS and MES of Ukraine; 2014. 408 p. [in Russian].
2. Chernogor LF. Physics of Geospace Storms. *Space Science and Technology.* 2021;27(1(128)):3-77. [in Ukrainian].
3. Emelyanov LY, Katsko SV, Chernogor LF. Ionospheric effects of geospace storms on December 21–24, 2016 and March 21–23, 2017. *Bulletin of the NTU “KhPI”. Radio Physics and Ionosphere.* 2019;25(1350):78-85. [in Russian].
4. Katsko SV, Emelyanov LY, Chernogor LF. Ionosphere response to space weather events on 21–23 March 2017 in the central region of Europe. 2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS). 2021:01-04. <https://doi.org/10.23919/URSIGASS51995.2021.9560587>
5. Luo Y, Chornogor LF, Garmash KP. Magneto-ionospheric effects from geospace storm of March 21–23, 2017. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2022;38(2):61-72.

6. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Zheng Yu. Effects of the Strong Ionospheric Storm of August 26, 2018: Results of Multipath Radiophysical Monitoring. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2021;61(1):73-91.
7. Chernogor LF, Shevelev MB. Latitudinal dependence of quasi-periodic variations in the geomagnetic field during the greatest geospace storm of September 7–9, 2017. *Space Sci. & Technol*. 2020;26(2):72-83. [in Russian].
8. Chornogor LF. Statistical characteristics of geomagnetic storms in the 24th cycle of solar activity. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2021;37(4):49-59. <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.04.049> [in Ukrainian].
9. Chornogor LF, Holub MYu, Luo Y. Statistical characteristics of geomagnetic storm activity during solar cycle 24, 2009–2020. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Radio Physics and Electronics"*. 2020;33:69-77. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-06> [in Ukrainian].
10. Blagoveshchensky DV, Sergeeva MA. Impact of geomagnetic storm of September 7–8, 2017 on ionosphere and HF propagation: A multi-instrument study. *Adv. Space Res*. 2019;63(1):239-256. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.07.016>
11. Blagoveshchensky DV, Zhbakov GA, Maltseva OA. Observed and Calculated Ionograms of Oblique Ionospheric Sounding on HF Radio Paths During a Magnetic Storm of September 7–8, 2017. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2019;61(12):881-892. <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09944-3>
12. Bolaji OS, Fashae JB, Adebisi SJ, Owolabi C, Adebisin BO, Kaka RO, Ibanga J, Abass M, Akinola OO, Adekoya BJ, Younas W. Storm Time Effects on Latitudinal Distribution of Ionospheric TEC in the American and Asian-Australian Sectors: August 25–26, 2018 Geomagnetic Storm. *J. Geophys. Res*. 2021;126(8). id. e2020JA029068. <https://doi.org/10.1029/2020JA029068>
13. 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. *Adv. Space Res*. 2020;66(2):226-242. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.037>
14. Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Zheng Y. Radio Wave Characteristics Distorted During Geospace Storm: Results of Multi-Frequency Multiple Path Oblique Sounding of Ionosphere. *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Lviv, Ukraine, August 26-28. 2021:151-156. <https://doi.org/10.1109/UKRCON53503.2021.9576010>
15. Chernogor LF, Zheng Y, Guo Q, Luo Y, Garmash KP, Rozumenko VT. Features of Ionospheric and Magnetic Effects of August 5–6, 2019 Noticeable Geospace Storm Over China and Ukraine. *Problems of Geocosmos – 2020*. Chapter 28. Springer Nature Switzerland AG. 2022:379-396.
16. D'Angelo G, Piersanti M, Alfonsi L, Spogli L, Clausen LBN, Coco I, Li G, Baiqi N. The response of high latitude ionosphere to the 2015 St. Patrick's day storm from in situ and ground based observations. *Adv. Space Res*. 2018;62(3):638-650. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.05.005>
17. Despirak IV, Kleimenova NG, Gromova LI, Gromov SV, Malysheva LM. Supersubstorms during Storms of September 7–8, 2017. *Geomagn. Aeron*. 2020;60(3):292-300. <https://doi.org/10.1134/S0016793220030044>
18. Dmitriev AV, Suvorova AV, Klimenko MV, Klimenko VV, Ratovsky KG, Rakhmatulin RA, Parkhomov VA. Predictable and unpredictable ionospheric disturbances during St. Patrick's Day magnetic storms of 2013 and 2015 and on 8–9 March 2008. *J. Geophys. Res*. 2017;122(2):2398-2423. <https://doi.org/10.1002/2016JA023260>
19. Fejer BG, Navarro LA, Sazykin S, Newheart A, Milla MA, Condor P. Prompt Penetration and Substorm Effects Over Jicamarca During the September 2017 Geomagnetic Storm. *J. Geophys. Res*. 2021;126(8). id. e2021JA029651. <https://doi.org/10.1029/2021JA029651>
20. Feng J, Zhou Y, Zhou Y, Gao S, Zhou C, Tang Q, Liu Y. Ionospheric response to the 17 March and 22 June 2015 geomagnetic storms over Wuhan region using GNSS-based tomographic technique. *Adv. Space Res*. 2021;67(1):111-121. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.008>
21. Ghodpage RN, Patil PT, Gurav OB, Gurubaran S, Sharma AK. Ionospheric response to major storm of 17th March 2015 using multi-instrument data over low latitude station Kolhapur (16.8°N, 74.2°E, 10.6° dip. Lat.). *Adv. Space Res*. 2018;62(3):624-637. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.05.003>
22. Imtiaz N, Younas W, Khan M. Response of the low-to mid-latitude ionosphere to the geomagnetic storm of September 2017. *Ann. Geophys*. 2020;38(2):359-372. <https://doi.org/10.5194/angeo-38-359-2020>
23. Jiang C, Yang G, Liu J, Yokoyama T, Liu T, Lan T, Zhou C, Zhang Y, Zhao Z, Komolmis T, Supnithi P, Yatini CY. Equatorial and low-latitude ionospheric response to the 17-18 March 2015 great storm over South East Asia longitude sector. *J. Geophys. Res*. 2017;122(5):5756-5767. <https://doi.org/10.1002/2017JA024134>
24. Jimoh O, Lei J, Zhong J, Owolabi C, Luan X, Dou X. Topside Ionospheric Conditions During the 7–8 September 2017 Geomagnetic Storm. *J. Geophys. Res*. 2019;124(11):9381-9404. <https://doi.org/10.1029/2019JA026590>
25. Jin S, Jin R, Kutoglu H. Positive and Negative Ionospheric Responses to the March 2015 Geomagnetic Storm from BDS Observations. *J. Geodes*. 2017;91(6):613-626. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0988-4>

26. Jonah OF, Coster A, Zhang S, Goncharenko L, Erickson PJ, de Paula ER, Kherani EA. TID Observations and Source Analysis During the 2017 Memorial Day Weekend Geomagnetic Storm Over North America. *J. Geophys. Res.* 2018;123(10):8749-8765. <https://doi.org/10.1029/2018JA025367>
27. Kumar S, Kumar VV. Ionospheric Response to the St. Patrick's Day Space Weather Events in March 2012, 2013, and 2015 at Southern Low and Middle Latitudes. *J. Geophys. Res.* 2019;124(1):584-602. <https://doi.org/10.1029/2018JA025674>
28. Kumar VV, Parkinson ML. A Global Scale Picture of Ionospheric Peak Electron Density Changes during Geomagnetic Storms. *Space Weather.* 2017;15(4):637-652. <https://doi.org/10.1002/2016SW001573>
29. Lei J, Huang F, Chen X, Zhong J, Ren D, Wang W, Yue X, Luan X, Jia M, Dou X, Hu L, Ning B, Owolabi C, Chen J, Li G, Xue X. Was magnetic storm the only driver of the long-duration enhancements of daytime total electron content in the Asian-Australian sector between 7 and 12 September 2017? *J. Geophys. Res.* 2018;123(4):3217-3232. <https://doi.org/10.1029/2017JA025166>
30. Li S. Temporal evolution analysis of storm-enhanced density during an intense magnetic storm on March 2015. *Adv. Space Res.* 2021;67(5):1570-1579. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.12.004>
31. Lissa D, Srinivasu VKD, Prasad DSVVD, Niranjana K. Ionospheric response to the 26 August 2018 geomagnetic storm using GPS-TEC observations along 80°E and 120°E longitudes in the Asian sector. *Adv. Space Res.* 2020;66(6):1427-1440. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.025>
32. Liu G, Shen H. A severe negative response of the ionosphere to the intense geomagnetic storm on March 17, 2015 observed at mid- and low-latitude stations in the China zone. *Adv. Space Res.* 2017;59(9):2301-2312. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.02.021>
33. Liu J, Zhang D-H, Coster AJ, Zhang S-R, Ma G-Y, Hao Y-Q, Xiao Z. A case study of the large-scale traveling ionospheric disturbances in the eastern Asian sector during the 2015 St. Patrick's Day geomagnetic storm. *Ann. Geophys.* 2019;37(4):673-687. <https://doi.org/10.5194/angeo-37-673-2019>
34. Luo Y, Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Rozumenko VT, Zheng Yu. Dynamic processes in the magnetic field and in the ionosphere during the 30 August 2 September, 2019 geospace storm. *Ann. Geophys.* 2021;39(4). <https://doi.org/10.5194/angeo-39-657-2021>
35. Luo Y, Guo Q, Zheng Y, Гармаш КП, Черногор ЛФ, Шульга СМ. Ефекти геокосмічної бурі 5—6 серпня 2019 р. *Космічна наука і технологія.* 2021;27(2)(129):45-69. <https://doi.org/10.15407/knit2021.02.045>
36. Mansilla GA, Zossi MM. Longitudinal Variation of the Ionospheric Response to the 26 August 2018 Geomagnetic Storm at Equatorial/Low Latitudes. *Pure Appl. Geophys.* 2020;177(12):5833-5844. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02601-1>
37. Ngwira CM, Habarulema J-B, Astafyeva E, Yizengaw E, Jonah OF, Crowley G, Gisler A, Coffey V. Dynamic Response of Ionospheric Plasma Density to the Geomagnetic Storm of 22-23 June 2015. *J. Geophys. Res.* 2019;124(8):7123-7139. <https://doi.org/10.1029/2018JA026172>
38. Nykiel G, Zanimonskiy YM, Yampolski YuM, Figurski M. Efficient usage of dense GNSS networks in central Europe for the visualization and investigation of ionospheric TEC variations. *Sensors.* 2017;17(10). id. 2298. <https://doi.org/10.3390/s17102298>
39. Olwendo OJ, Cesaroni C, Yamazaki Y, Cilliers P. Equatorial ionospheric disturbances over the East African sector during the 2015 St. Patrick's day storm. *Adv. Space Res.* 2017;60(8):1817-1826. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.06.037>
40. Paul B, De BK, Guha A. Latitudinal variation of F-region ionospheric response during three strongest geomagnetic storms of 2015. *Acta Geodaetica et Geophysica.* 2018;53(4):579-606. <https://doi.org/10.1007/s40328-018-0221-4>
41. Piersanti M, Cesaroni C, Spogli L, Alberti T. Does TEC react to a sudden impulse as a whole? The 2015 Saint Patrick's day storm event. *Adv. Space Res.* 2017;60(8):1807-1816. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.021>
42. 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. *Adv. Space Res.* 2017;60(11):2464-2476. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.030>
43. Ray S, Roy B, Paul KS, Goswami S, Oikonomou C, Haralambous H, Chandel B, Paul A. Study of the effect of 17–18 March 2015 geomagnetic storm on the Indian longitudes using GPS and C/NOFS. *J. Geophys. Res.* 2017;122(2):2551-2563. <https://doi.org/10.1002/2016JA023127>
44. Rubtsov AV, Maletckii BM, Danilchuk EI, Smotrova EE, Shelkov AD, Yasyukevich AS. Ionospheric disturbances over eastern Siberia during April 12-15, 2016 geomagnetic storms. *Sol.-Terr. Phys.* 2020;6(1):60-68. <https://doi.org/10.12737/STP-61202007>
45. Şentürk E. Investigation of global ionospheric response of the severe geomagnetic storm on June 22–23, 2015 by GNSS-based TEC observations. *Astrophys. Space Sci.* 2020;365(7). id. 110. <https://doi.org/10.1007/s10509-020-03828-z>
46. Shpynev BG, Zolotukhina NA, Polekh NM, Ratovsky KG, Chernigovskaya MA, Belinskaya AY, Stepanov AE, Bychkov VV, Grigorjeva SA, Panchenko VA, Korenkova NA, Mielich J. The ionosphere response to severe

- geomagnetic storm in March 2015 on the base of the data from Eurasian high-middle latitudes ionosonde chain. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018;180:93-105. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.10.014>
47. Shreedevi PR, Choudhary RK, Thampi SV, Yadav S, Pant TK, Yu Y, McGranaghan R, Thomas EG, Bhardwaj A, Sinha AK. Geomagnetic Storm-Induced Plasma Density Enhancements in the Southern Polar Ionospheric Region: A Comparative Study Using St. Patrick's Day Storms of 2013 and 2015. *Space Weather.* 2020;18(8). id. e2019SW002383. <https://doi.org/10.1029/2019SW002383>
  48. Spogli L, Sabbagh D, Regi M, Cesaroni C, Perrone L, Alfonsi L, Mauro DDi, Lepidi S, Campuzano SA, Marchetti D, Santis ADe, Malagnini A, Scotto C, Cianchini G, Shen X, Piscini A, Ippolito A. Ionospheric Response Over Brazil to the August 2018 Geomagnetic Storm as Probed by CSES-01 and Swarm Satellites and by Local Ground-Based Observations. *J. Geophys. Res.* 2021;126(2). id. e2020JA028368. <https://doi.org/10.1029/2020JA028368>
  49. Sun W-J, Ning B-Q, Zhao B-Q, Li G-Z, Hu L-H, Chang S-M. Analysis of ionospheric features in middle and low latitude region of China during the geomagnetic storm in March 2015. *Acta Geophysica Sinica.* 2017;60(1):1-10.
  50. Uryadov VP, Vybornov FI, Pershin AV. Features of the HF Signal Propagation on Oblique Sounding Paths During Solar and Magnetic Activity in September 2017. *Radiophys. Quantum Electr.* 2019;62(2):85-98. <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09956-z>
  51. Venkatesh K, Tulasi Ram S, Fagundes PR, Seemala GK, Batista IS. Electrodynamical disturbances in the Brazilian equatorial and low-latitude ionosphere on St. Patrick's Day storm of 17 March 2015. *J. Geophys. Res.* 2017;122(4):4553-4570. <https://doi.org/10.1002/2017JA024009>
  52. Verkhoglyadova OP, Komjathy A, Mannucci AJ, Mlynzcak MG, Hunt LA, Paxton LJ. Revisiting ionosphere-thermosphere responses to solar wind driving in superstorms of November 2003 and 2004. *J. Geophys. Res.* 2017;122(10):10,824-10,850. <https://doi.org/10.1002/2017JA024542>
  53. Wang Z, Zou S, Liu L, Ren J, Aa E. Hemispheric Asymmetries in the Mid-latitude Ionosphere During the September 7–8, 2017 Storm: Multi-instrument Observations. *J. Geophys. Res.* 2021;126(4). id. e2020JA028829. <https://doi.org/10.1029/2020JA028829>
  54. Xu Z., Hartinger M., Clauer C., Peek T., Behlke R. A comparison of the ground magnetic responses during the 2013 and 2015 St Patrick's Day geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2017. 122, Is. 4. P. 4023—4036. DOI: 10.1002/2016JA023338
  55. Younas W, Amory-Mazaudier C, Khan M, Fleury R. Ionospheric and Magnetic Signatures of a Space Weather Event on 25–29 August 2018: CME and HSSWs. *J. Geophys. Res.* 2020;125(8). id. e2020JA027981. <https://doi.org/10.1029/2020JA027981>
  56. Zakharenkova I, Cherniak I, Krankowski A. Features of Storm-Induced Ionospheric Irregularities From Ground-Based and Spaceborne GPS Observations During the 2015 St. Patrick's Day Storm. *J. Geophys. Res.* 2019;124(12):10728-10748. <https://doi.org/10.1029/2019JA026782>
  57. Zhang S-R, Erickson PJ, Zhang Y, Wang W, Huang C, Coster AJ, Holt JM, Foster JF, Sulzer M, Kerr R. Observations of ion-neutral coupling associated with strong electrodynamic disturbances during the 2015 St. Patrick's Day storm. *J. Geophys. Res.* 2017;122(1):1314-1337. <https://doi.org/10.1002/2016JA023307>
  58. Zolotukhina N, Polekh N, Kurkin V, Rogov D, Romanova E, Chelpanov M. Ionospheric effects of St. Patrick's storm over Asian Russia: 17–19 March 2015. *J. Geophys. Res.* 2017;122(2):2484-2504. <https://doi.org/10.1002/2016JA023180>
  59. Chernogor LF, Garmash KP, Podnos VA, Tyrnov OF. The V. N. Karazin Kharkiv National University Radio Physical Observatory – the tool for ionosphere monitoring in space experiments. In: Zasukha SA and Fedorov OP, eds. *Space Project "Ionosat-Micro"*. Kyiv, Ukraine: Academperiodika Publ., 2013. 160-182. [in Russian].
  60. Chernogor LF. Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: Specific features and experimental results. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2008;48(5):652-673. [in Russian].
  61. Chernogor LF. Geomagnetic pulsations accompanied the solar terminator moving through magnetoconjugate region. *Radio Phys. Radio Astron.* 2012;17(1):57-67. [in Russian].

Стаття надійшла до редакції: 20 квітня 2022 р.

Рекомендовано до друку: 6 червня 2022 р.



**SPECTRAL CONTENT OF FLUCTUATIONS IN THE GEOMAGNETIC FIELD DURING THE COURSE OF MARCH 21–23, 2017 GEOSPACE STORMS**

**L. F. Chernogor, K. P. Garmash, S. G. Leus, V. A. Podnos, A. M. Tsymbal, M. B. Shevelev, Y. Luo**  
*V.N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine, 61022, Kharkiv, Svobody Square, 4*

**Relevance.** Magnetic storms have been studied for a long time, with particular attention being paid to unique storms, which occur only 1 or 3 times per solar cycle. The occurrence rates of moderate storms are much higher. The magnetic storms have been determined to exhibit high variability, with each storm having a particular history. Therefore, the study of any magnetic storm in detail is of interest.

**The aim of this work** is to present the spectral analysis of the geomagnetic field fluctuations observed to occur during the geospace storm of March 21–23, 2017 and on neighboring days.

**Methods and Methodology.** The database from the fluxmeter magnetometer at the V. N. Karazin Kharkiv National University Magnetometer Observatory (49°38' N, 36°56' E geographic coordinates) has been used to analyze the fluctuations in the horizontal components of the geomagnetic field in the 1–1,000-s period range. The temporal variations in the horizontal components are subjected to the systems spectral analysis that includes mutually complementary the wavelet transform, the short-time Fourier transform, and the Fourier transform in a sliding window with a width adjusted to be equal to a fixed number of harmonic periods. The Fourier transform in a sliding window provides the highest resolution for periods.

**Results.** The systems spectral analysis of the horizontal components of the geomagnetic field has been carried out both in the 1–1,000-s period range and in the three separate period subranges of 1–50 s, 50–200 s, and 200–1,000 s. The component intensities are estimated to be the largest in the 200–1,000-s period subrange. On the reference days, the level of fluctuations is usually observed to not exceed  $\pm(0.2–0.5)$  nT, whereas it shows an increase of  $\pm(4–6)$  nT during the course of the first magnetic storm, and of  $\pm 2$  nT during the second magnetic storm. In the course of the sudden commencement of the first storm, the period of the oscillation predominant in the spectrum is estimated to be about 350 and 600 s, whereas during the course of the main phase of the magnetic storm, the period of the oscillation predominant in the spectrum is estimated to be 800–900 s. During the recovery phase of the magnetic storm, the level of fluctuations in the geomagnetic field is estimated to not usually exceed  $\pm(1–2)$  nT, whereas the period of the predominant oscillation is observed to be 700–900 s. The dawn and dusk terminators are accompanied by an increase in the level of fluctuations in the geomagnetic field.

**Conclusions.** The temporal variations parameters in the spectral components of the geomagnetic field have been determined during the moderate magnetic storm.

**KEY WORDS:** *magnetic storm, geomagnetic field, spectral component, temporal variations*

The article was received by the editors: April 20, 2022.

The article is recommended for printing: June 6 2022