

<https://doi.org/10.15407/knit2021.02.045>
УДК 551.5:539.104 (078)

Y. LUO¹, Postgraduate at the Department of the Theoretic Radiophysics

Q. GUO², Ph. D., Professor

Y. ZHENG³, Ph. D., Professor

К. П. ГАРМАШ¹, старш. наук. співроб. кафедри космічної радіофізики факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем, канд. фіз.-мат. наук

Л. Ф. ЧОРНОГОР¹, зав. кафедри космічної радіофізики факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем, д-р фіз.-мат. наук, проф.

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

С. М. ШУЛЬГА¹, декан факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем, професор кафедри теоретичної радіофізики факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем, д-р фіз.-мат. наук, проф.

¹ Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Майдан Свободи 4, Харків, Україна, 61022

² Інститут інформації та телекомунікаційних технологій Харбінського інженерного університету (КНР)
Harbin Engineering University

145-1 Nantong Str., Nangang District, Harbin, Heilongjiang Province, 150001 China

³ Ціндаоський університет (КНР)

Qingdao University

08 Ning Xia Lu, Laoshan District, Qingdao, Shandong, 266071 China

ЕФЕКТИ ГЕОКОСМІЧНОЇ БУРІ 5—6 СЕРПНЯ 2019 р.

Актуальність роботи полягає у тому, що геокоосмічні бурі, які є проявом синергетичної взаємодії магнітних, іоносферних, атмосферних бур та бур в електричному полі магнітосферного, іоносферного й атмосферного походження, відрізняються великим різноманіттям. Немає двох однакових проявів геокоосмічних бур, через що актуальною задачею є дослідження ефектів кожної нової бурі, яке дозволить виявити як загальні закономірності у протіканні бурі, так і її індивідуальні особливості.

Метою роботи є викладення загальних відомостей про геокоосмічну бурю, результатів аналізу особливостей магнітної та іоносферної бур.

Для аналізу магнітної обстановки залучалися результати вимірювань флуктуацій магнітного поля в діапазоні періодів 1...1000 с, виконаних у Магнітометричній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна та варіацій трьох складових геомагнітного поля, виконаних у Низькочастотній обсерваторії Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України. Для аналізу іоносферної обстановки використовувалися багаточастотні багатотрасові вимірювання, виконані в Харбінському інженерному університеті (КНР), залучалися також дані іонозондів. Як виявилось, збільшення основних параметрів сонячного вітру 5 серпня 2019 р. призвело до геокоосмічної бурі, яка спостерігалася 5 та 6 серпня 2019 р. Головна фаза магнітної бурі мала місце 5 серпня 2019 р. з 06:00 до 08:30. Фаза відновлення тривала не менше чотирьох діб. Магнітна буря проявляла себе в суттєвих варіаціях всіх складових геомагнітного поля, збільшенням на порядок рівня коливаний геомагнітного поля в діапазоні періодів 400...950 с. Протягом іоносферної бурі мали місце значні збурення F-області іоносфери. E-область іоносфери залишалась слабо збуреною. Іоносферна буря суттєво вплинула на доплерівські спектри радіохвиль в діапазоні частот 5...10 МГц. Мали місце значне розширення доплерівських

Цитування: Luo Y., Guo Q., Zheng Y., Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шульга С. М. Ефекти геокоосмічної бурі 5—6 серпня 2019 р. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 2 (129). С. 45—69. <https://doi.org/10.15407/knit2021.02.045>

спектрів, варіації доплерівського зміщення частоти та його квазіперіодичні зміни з періодом 20...40 хв і тривалістю 120...240 хв. Квазіперіодичні варіації доплерівського зміщення частоти були зумовлені квазіперіодичними варіаціями концентрації електронів, амплітуда їхніх відносних збурень змінювалася від 3 до 16 %. На одній з трас амплітуда доплерівського зміщення частоти сягала 0.7 Гц. При цьому амплітуда відносних збурень концентрації електронів могла досягати 80...90 %. Іоносферна буря не вплинула суттєво на амплітуду сигналу на більшості радіотрас.

Ключові слова: геокосмічна буря, магнітна буря, іоносферна буря, комплекс похилого зондування іоносфери, доплерівські спектри, доплерівське зміщення частоти, квазіперіодичні варіації, концентрація електронів.

ВСТУП

Причиною геокосмічної бурі є сонячні бурі. Сонячні спалахи і корональні викиди маси призводять до різноманітних ефектів у системі Сонце — міжпланетне середовище — магнітосфера — іоносфера — атмосфера — Земля (внутрішні оболонки) (СМСМАЗ). В результаті виникають геокосмічні бурі, які є бурями у магнітному полі, в іоносфері, атмосфері та електричному полі магнітосферного, іоносферного й атмосферного походження, що синергетично взаємодіють між собою [7]. Ефекти геокосмічних бур відрізняються великою різноманітністю. Ефекти залежать від особливостей сонячної бурі, параметрів сонячного вітру, стану геоболонок, фази сонячної активності, пори року і доби, географічних і геомагнітних координат місця спостережень і

використовуваних для спостережень засобів [1—3, 7, 9—16, 18—20, 27, 29, 30, 32—40].

Вперше ефекти іоносферної бурі було описано майже 100 років тому в роботі [25]. Зв'язок магнітної бурі з іоносферними збуреннями почав вивчатися в роботі [8]. Статистичний підхід до дослідження іоносферних збурень був вперше застосований в роботі [32], а потім його було використано в роботах [41, 42, 44]. Узагальнення результатів дослідження взаємозв'язку сонячних, магнітних та іоносферних збурень зроблено в роботах [13, 7, 9, 13—15, 19—21, 27, 29, 37, 38, 40]. Результати сучасних досліджень ефектів іоносферних збурень представлено, наприклад, в роботах [10, 12, 16, 18, 30, 31, 36, 39, 43, 44].

Незважаючи на значні досягнення, актуальним завданням, як і раніше, є дослідження ефектів кожної нової геокосмічної бурі.

Основні відомості про радіотраси (за матеріалами <https://fmscan.org/index.php>)

Частота, кГц	Координати передавача	Місцезнаходження (країна)	Відстань до Харбіна, км	Координати середини траси
5000	34.95°N, 109.56°E	Lintong/Pucheng (Лінтон/Пучен, Китай)	1875	40.37°N, 118.12°E
6015	37.21°N, 126.78°E	Hwaseong (Хвасон, Корея)	950	41.50°N, 126.73°E
6055	35.47°N, 140.21°E	Chiba/Nagara (Тіба/Нагара, Японія)	1610	40.63°N, 133.45°E
6080	49.18°N, 119.72°E	Hailar/Nanmen (Гайлар/Наньмень, Китай)	645	47.48°N, 123.2°E
6175	39.75°N, 116.81°E	Beijing (Пекін, Китай)	1050	42.77°N, 121.75°E
6600	37.60°N, 126.85°E	Goyang (Гоян, Корея)	910	41.69°N, 126.77°E
7260	47.80°N, 107.17°E	Ulaanbaatar/Khonkhor (Улан-Батор/Хонхор, Монголія)	1496	46.79°N, 116.93°E
7295	62.24°N, 129.81°E	Yakutsk (Якутськ, Росія)	1845	54.01°N, 128.25°E
7345	62.24°N, 129.81°E	Yakutsk (Якутськ, Росія)	1845	54.01°N, 128.25°E
9500	38.47°N, 114.13°E	Shijiazhuang (Шицзячжуан, Китай)	1310	42.13°N, 120.41°E
9520	40.72°N, 111.55°E	Hohhot (Гуг-Гото, Китай)	1340	43.25°N, 119.12°E
9675	39.75°N, 116.81°E	Beijing (Пекін, Китай)	1050	42.77°N, 121.75°E
9750	36.17°N, 139.82°E	Yamata (Ямата, Японія)	1570	40.98°N, 133.25°E
9830	39.75°N, 116.81°E	Beijing (Пекін, Китай)	1050	42.77°N, 121.75°E

Метою роботи є виклад загальних відомостей про геокоsmічну бурю, результатів аналізу особливостей магнітної та іоносферної бур.

ЗАСОБИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ І МЕТОДИ АНАЛІЗУ

Для досліджень використовувалися дані спостережень, отримані за допомогою чотирьох приладів, розташованих у різних локаціях земної поверхні.

1. *Магнітометр-флюксометр*. Розташований у Магнітометричній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (ХНУ, 49.64° N, 36.93° E). Вимірює флуктуації H -і D -складових геомагнітного поля в діапазоні періодів $T = 1...1000$ с. Часова роздільна здатність становить 0.5 с. Чутливість магнітометра дорівнює 0.001...0.5 нТл при $T \approx 1...1000$ с. Магнітометр-флюксометр докладніше описаний в роботі [5].

2. *Магнітометр*. Метеомагнітна станція LEMI-017 розташована в Низькочастотній обсерваторії Радіоастрономічного інституту Національної академії наук України (РІ НАН України, 49.93° N, 36.95° E) [http://geospace.com.ua/data/metmag_mf.php]. Вимірює три складові магнітного поля (H , D і Z). Роздільна здатність по часу — 1 с, чутливість — 10 пТл.

3. *Багаточастотний багатотрасовий програмно-апаратний радіотехнічний комплекс похилого зондування іоносфери*. Розташований на території Харківського інженерного університету (КНІУ) (45.78° N, 126.68° E) [6, 16—18, 22—24]. Здійснює неперервний моніторинг стану іоносфери на 14 радіотрасах. Використовується радіовипромінювання ширококомовних радіостанцій, дислокованих в Китаї, Південній Кореї, Японії, Росії та Монголії в діапазоні частот 5...10 МГц (рис. 1). Довжина радіотрас близька до 1...2 тис. км. Параметри радіотрас наведено в таблиці. Приймання та обробка сигналів провадиться на території Харківського інженерного університету.

4. *Іонозонд*. Використовується для загальної оцінки стану іоносфери. Розташований в Японії поблизу м. Вакканай (Wakkanai, URSI-код WK546, 45.16° N, 141.75° E) [URL: wdc.nict.go.jp/IONO/HP2009/contents/Ionosonde_Map_E.html].

Рівень сигналу магнітометра-флюксометра з урахуванням амплітудно-частотної характеристики приладу спочатку перетворюється з віднос-

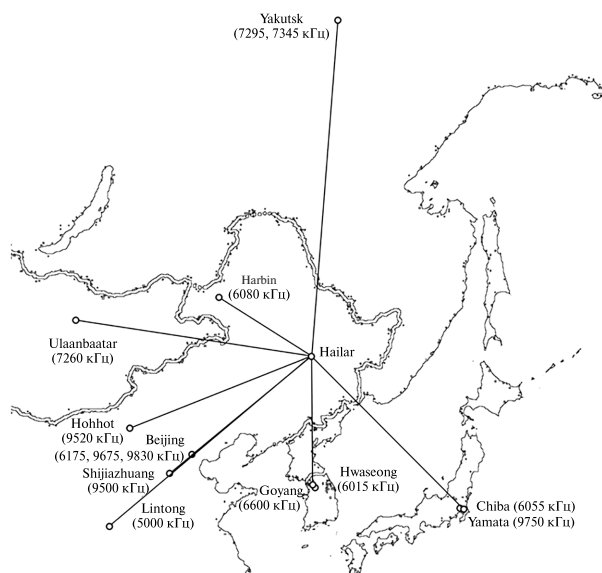


Рис. 1. Схема розташування радіотрас для моніторингу динамічних процесів у іоносфері над Китаєм

них одиниць в абсолютні. Потім часові варіації геомагнітного поля піддаються системному спектральному аналізу, який використовує одночасно віконне, адаптивне перетворення Фур'є, а також вейвлет-перетворення на базі материнської функції Морле [4]. Далі аналізуються отримані спектри.

Трикомпонентний магнітометр РІ НАН України служить для загального контролю стану геомагнітного поля. Спеціальної обробки сигналів при цьому не потрібно.

Дані вимірювань багаточастотного багатотрасового комплексу похилого зондування іоносфери піддавалися детальній обробці, спрямованій на отримання часових залежностей доплерівських спектрів, доплерівського зсуву частоти $f_D(t)$ основної моди і амплітуди $A(t)$ сигналу. Далі $f_D(t)$ і $A(t)$ підлягали вторинній обробці з метою отримання трендів $\bar{f}_D(t)$ і $\bar{A}(t)$, флуктуацій $\delta f_D(t) = f_D(t) - \bar{f}_D(t)$, $\delta A(t) = A(t) - \bar{A}(t)$, а також спектрів у діапазоні періодів $T \approx 1...60$ хв і більше. Для оцінки спектрів також використовувався системний спектральний аналіз.

АНАЛІЗ СТАНУ КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Стан космічної погоди 2—4 серпня 2019 р. був спокійним (рис. 2). 4 і 5 серпня 2019 р. спосте-

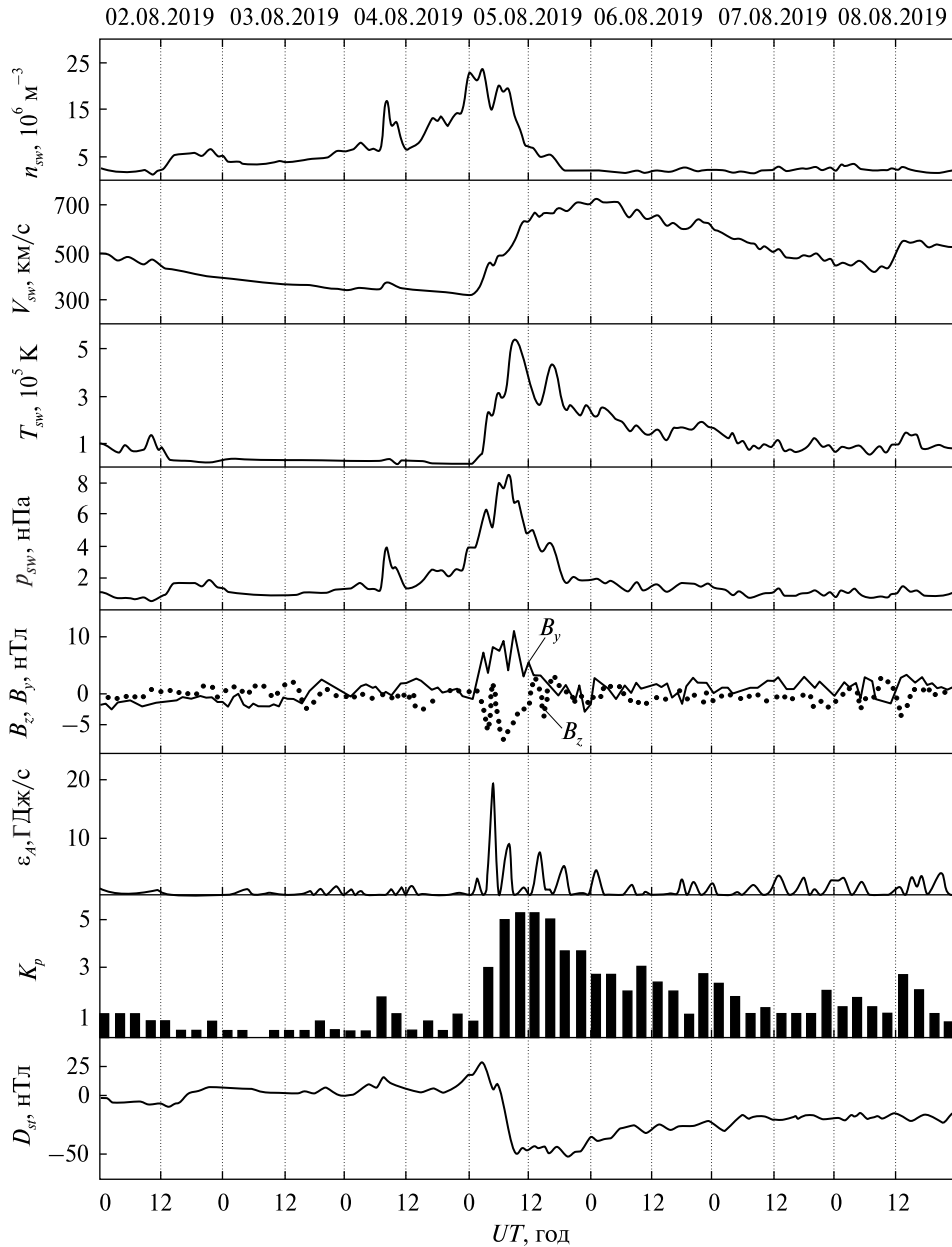


Рис. 2. Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряних концентрацій частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} (за даними сайту [ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/](http://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/)) і розрахованого динамічного тиску p_{sw} , виміряних складових B_z і B_y міжпланетного магнітного поля (за даними супутника ACE); розрахованих значень енергії ϵ_A , переданої сонячним вітром магнітосфері Землі за одиницю часу; K_p -індексу і D_{st} -індексу (за даними сайту <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/>) у період 2—8 серпня 2019 р.

рігалося збільшення концентрації частинок n_{sw} в сонячному вітрі від фонового значення $2.5 \cdot 10^6$ до $23 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$. Збільшення швидкості V_{sw} частинок приблизно від 350 до 700 км/с реєструвалося

5-6 серпня 2019 р. Далі V_{sw} поступово зменшувалася від 700 до 450 км/с. Різке збільшення температури частинок приблизно від 10^4 до $4.5 \cdot 10^5 \text{ К}$ мало місце у першій половині доби 5 серпня

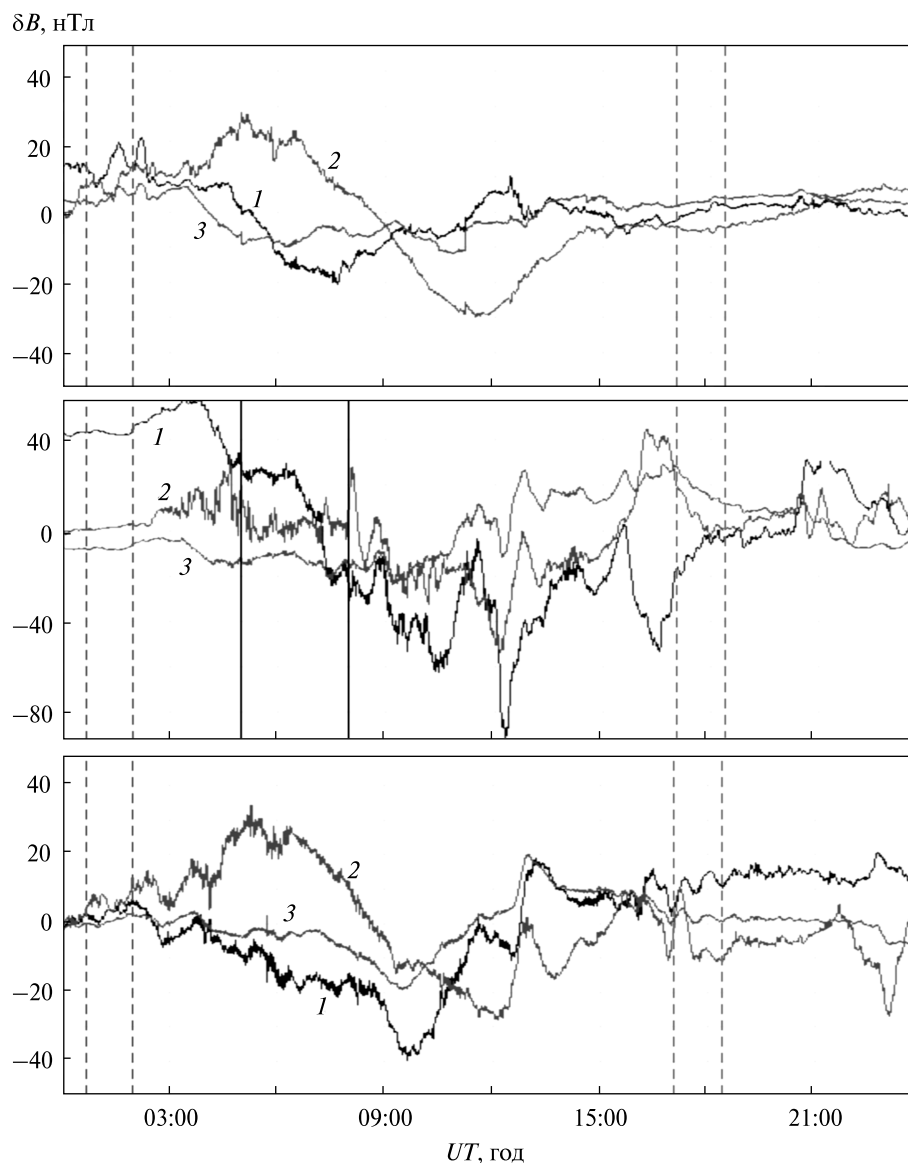


Рис. 3. Часові варіації рівня H -, D - і Z -складових геомагнітного поля 2, 5 і 6 серпня 2019 р. (панелі зверху вниз): 1 — H -складова, 2 — D -складова, 3 — Z -складова [http://geospace.com.ua/data/metmag_mf.php]. Суцільними вертикальними лініями показано інтервал часу, що відповідає головній фазі магнітної бурі, а штриховими лініями — моменти часу заходу і сходу Сонця на рівні Землі і на висоті 100 км

2019 р. за ним настало поступове зменшення до 10^5 К. Збільшення n_{sw} і V_{sw} призвело до збільшення динамічного тиску p_{sw} в сонячному вітрі від 0.5 до 8.5 нПа, яке спостерігалось 5 серпня 2019 р. За ним настало поступове зменшення p_{sw} від 8.5 до 1–2 нПа. 5 серпня 2019 р. відбувалося збільшення від 0 до 11.1 нТл азимутальної складової (B_y) міжпланетного магнітного поля. Май-

же синхронно з цим спостерігалось зменшення від 0 до -7.5 нТл його вертикальної складової B_z . З'явилися всі ознаки магнітної бурі. Спостерігалися потужні сплески енергії в одиницю часу (до 20 ГДж/с), що надходить від сонячного вітру у магнітосферу. Приблизно з 00:00 і до 04:00 UT 5 серпня 2019 р. (тут і далі — всесвітній час) значення індексу D_{st} збільшилися від 0 до 27 нТл.

Відмічено раптовий початок магнітної бурі. За цим відбулося різке падіння D_{st} -індексу від 27 до -50 нТл, яке означало настання головної фази магнітної бурі. Вона тривала приблизно з 06:00 до 08:30 5 серпня 2019 р. Далі протягом більш ніж чотирьох діб спостерігалася фаза відновлення. 3 і 4 серпня 2019 р. значення K_p -індексу не перевищували 1...2. Протягом 5 серпня 2019 р. вони змінювалися від 3 до 5.3. У наступну добу відзначалося поступове зменшення значень K_p до 1...2.

АНАЛІЗ МАГНІТНОЇ БУРІ

Наведемо спочатку часові варіації H -, D - і Z -складових геомагнітного поля, виміряні магнітометром РІ НАН України (рис. 3). У контрольні дні поведінка всіх трьох складових була подібною. Рівень H -складової, флюктууючи, спочатку зменшувався від позитивних значень до -20 ... -40 нТл, потім збільшувався до 0 ... 20 нТл. Рівень D -складової спочатку збільшувався приблизно від 0 до 30 нТл, потім зменшувався приблизно до -30 нТл, далі, флюктууючи, наближався до 0 нТл. Рівень Z -складової змінювався у межах від -20 до 20 нТл. Середнє квадратичне відхилення для всіх трьох складових було відносно невеликим (одиниці нанотесла).

5 серпня 2019 р., тобто в день магнітної бурі, варіації H -складової значно збільшилися (від 60 до -100 нТл). Рівень D -складової змінювався приблизно від 40 до -55 нТл. Помітно змінився і рівень Z -складової. Середнє квадратичне відхилення для всіх складових збільшилося на порядок (до 10 ... 20 нТл). Все це відображало факт виникнення магнітної бурі. Її прояви мали місце 5 серпня і частково 6 серпня 2019 р. Якщо 5 серпня 2019 р. спостерігалися раптовий початок і головна фаза бурі, то після 09:00 5 серпня, 6 серпня і до кінця доби 9 серпня 2019 р. — фаза відновлення.

Наведемо тепер результати спостереження флюктуацій H - і D -складових геомагнітного поля, виконані в ХНУ імені В. Н. Каразіна (рис. 4).

2 серпня 2019 р. рівень флюктуацій D - і H -складових не перевищував 0.5 ... 1 нТл. Найбільшу енергію мали складові з $T = 800$... 900 с.

5 серпня 2019 р. в інтервалі часу 03:00...07:00 рівень флюктуацій D - і H -складових виріс до

5 ... 7 нТл. У спектрі переважали періоди 400 ... 600 і 700 ... 900 с відповідно.

6 серпня 2019 р. з 00:00 до 07:00 рівень флюктуацій D - і H -складових не перевищував 2 ... 3 нТл. Найбільшу енергію мали коливання з $T = 400$... 800 с для D -складової і 700 ... 900 с для H -складової.

АНАЛІЗ ІОНОСФЕРНОЇ ОБСТАНОВКИ

Часові варіації параметрів іонограм, отриманих на іонозонді WK546 (Японія) показано на рис. 5. Видно, що 2, 5 і 6 серпня 2019 р. частота f_{\min} флюктувала біля значення 1.5 МГц. Цієї ж доби частота f_{oE} в денний час досягала 3.0 ... 3.3 МГц, а вранці і увечері була близькою до 2 МГц. Частота f_{oEs} змінювалася в широких межах: приблизно від 3 до 14 ... 16 МГц в окремі моменти часу. Протягом головної фази магнітної бурі, тобто приблизно в інтервалі часу 05:00...09:00 5 серпня 2019 р., величина f_{oEs} збільшувалася від 4 до 8 МГц. Частоту f_{oF2} вдавалося вимірювати дуже рідко. Протягом головної фази магнітної бурі реєструвалися її флюктуації від 5 до 10 МГц. Протягом фази відновлення $f_{oF2} \approx 6$ МГц. Після 13:30 5 серпня 2019 р. відзначалося її зменшення до 3 МГц.

Висота h'_E змінювалася від 90 до 120 ... 130 км. Протягом головної фази магнітної бурі спостерігалася її збільшення приблизно від 95 до 120 км. Це тривало близько 60 хв. Висота h'_{Es} 5 серпня 2019 р. флюктувала у межах від 90 до 120 ... 130 км. Вимірювань h'_{F2} було дуже мало. Протягом головної фази магнітної бурі відзначалось різке збільшення від 210 до 280 км.

Таким чином, іоносферна буря порівняно мало зачепила E -область іоносфери, але сильно позначилася на стані F -області іоносфери.

РЕЗУЛЬТАТИ ПОХИЛОГО ЗОНДУВАННЯ ІОНОСФЕРИ

Оскільки радіопередавальні пристрої випромінюють не постійно, для подальшого аналізу використовуються вимірювання для 10 з 14 радіотрас. З технічних причин контрольним днем обрано день 2 серпня, а не 4 серпня 2019 р.

Радиомаса Lintong / Pucheng — Harbin. Радіостанція, що випромінює на частоті 5000 кГц,

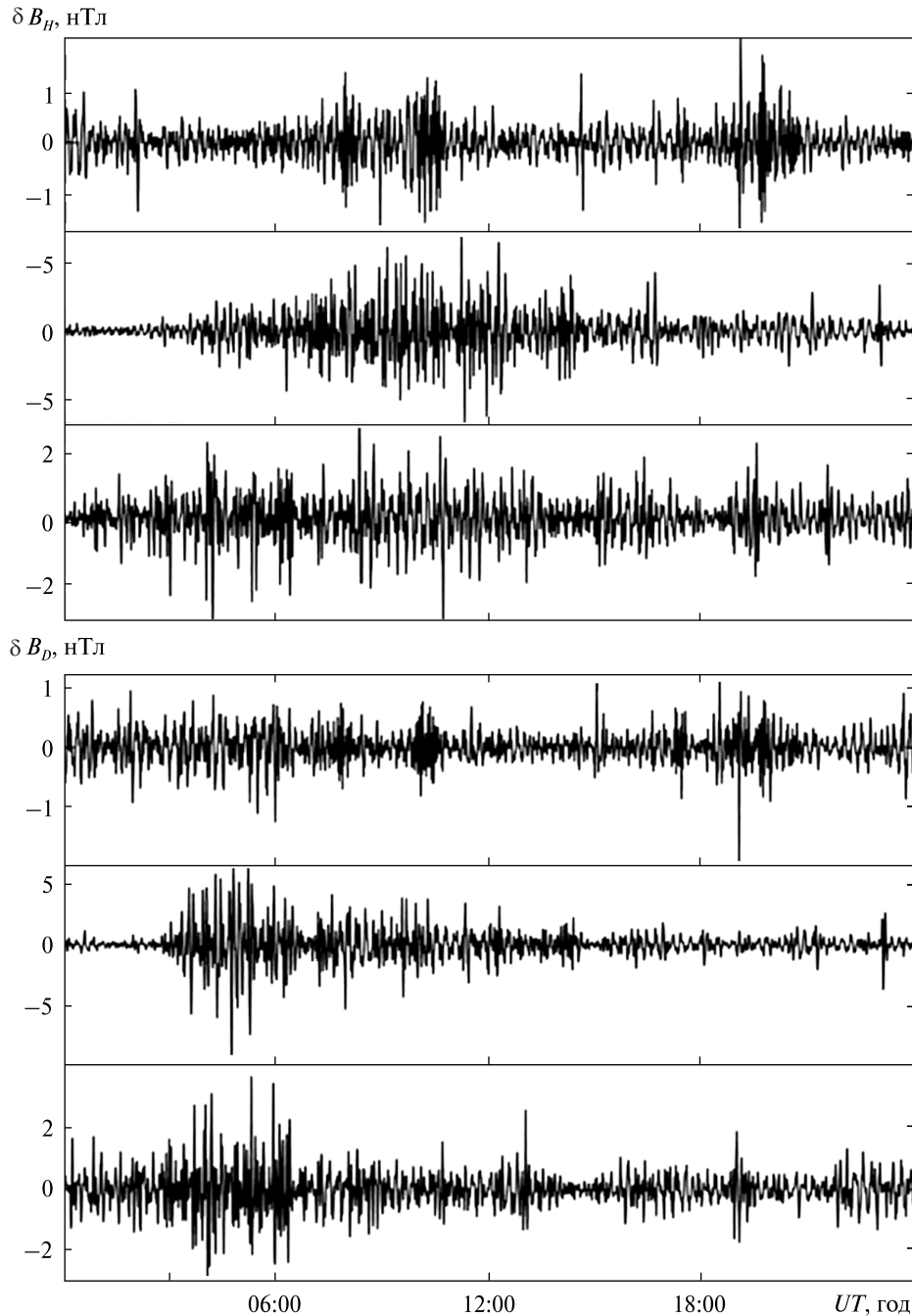


Рис. 4. Часові варіації рівня горизонтальних H - і D -складових геомагнітного поля в діапазоні періодів 100...1000 с 2, 5 і 6 серпня 2019 р. (панелі зверху вниз)

розташована на території Китаю. Довжина радіотраси уздовж земної поверхні $R \approx 1875$ км. До 06:00 радіостанція не випромінювала. Часові залежності доплерівських спектрів, іменованих

доплерограмами, і амплітуди сигналу для дня з магнітною бурею (5 серпня 2019 р.) і двох контрольних днів (2 і 6 серпня 2019 р.) наведено на рис. 6. Видно, що 2, 5 і 6 серпня 2019 р. доплерів-

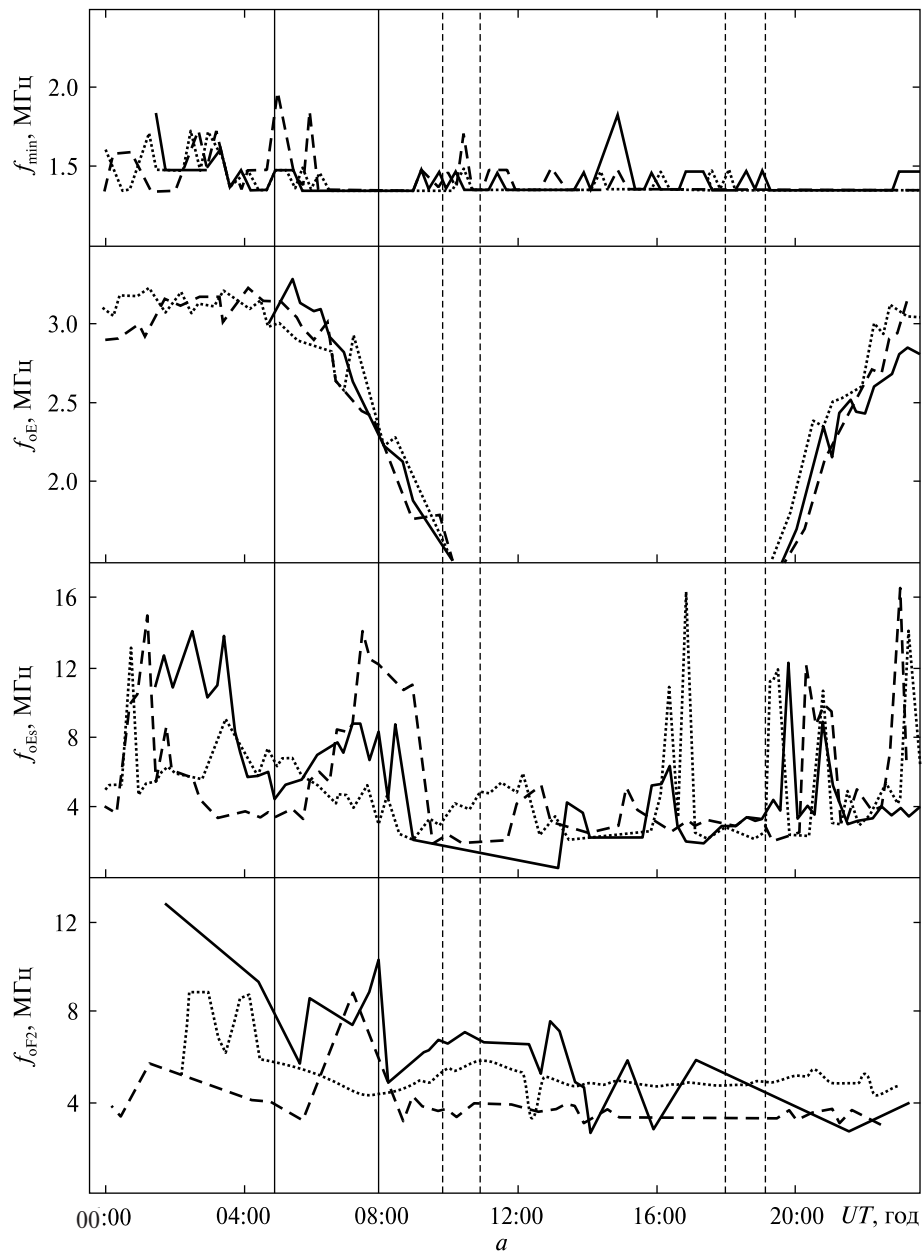


Рис. 5. Часові залежності f_{\min} , f_{oE} , f_{oEs} і f_{oF2} (а) і діючих висот (б) для 2 (точки), 5 (суцільна лінія) і 6 (штрихи) серпня 2019 р. Суцільними вертикальними лініями показано інтервал часу, що відповідає головній фазі магнітної бурі, а штриховими лініями — моменти часу заходу і сходу Сонця на рівні Землі і на висоті 100 км (див. також с. 53)

ські спектри були переважно дифузними. У день бурі дифузність істотно посилилася. Значні зміни характеру доплерівських спектрів спостерігалися в околі вечірнього сонячного термінатора (з 10:00 до 14:00), а також з 14:00 і до 20:00. Доплерівські спектри займали діапазон від -2.5 до

$2...2.5$ Гц. Протягом бурі доплерівське зміщення частоти $f_D(t)$ основної моди флукутувало в основному у межах від -0.5 до 0.5 Гц.

В інтервалі часу 06:20...09:20 5 серпня 2019 р. спостерігалися значні (до 10 дБВ) варіації амплітуди $A(t)$ сигналу, відсутні в контрольні дні.

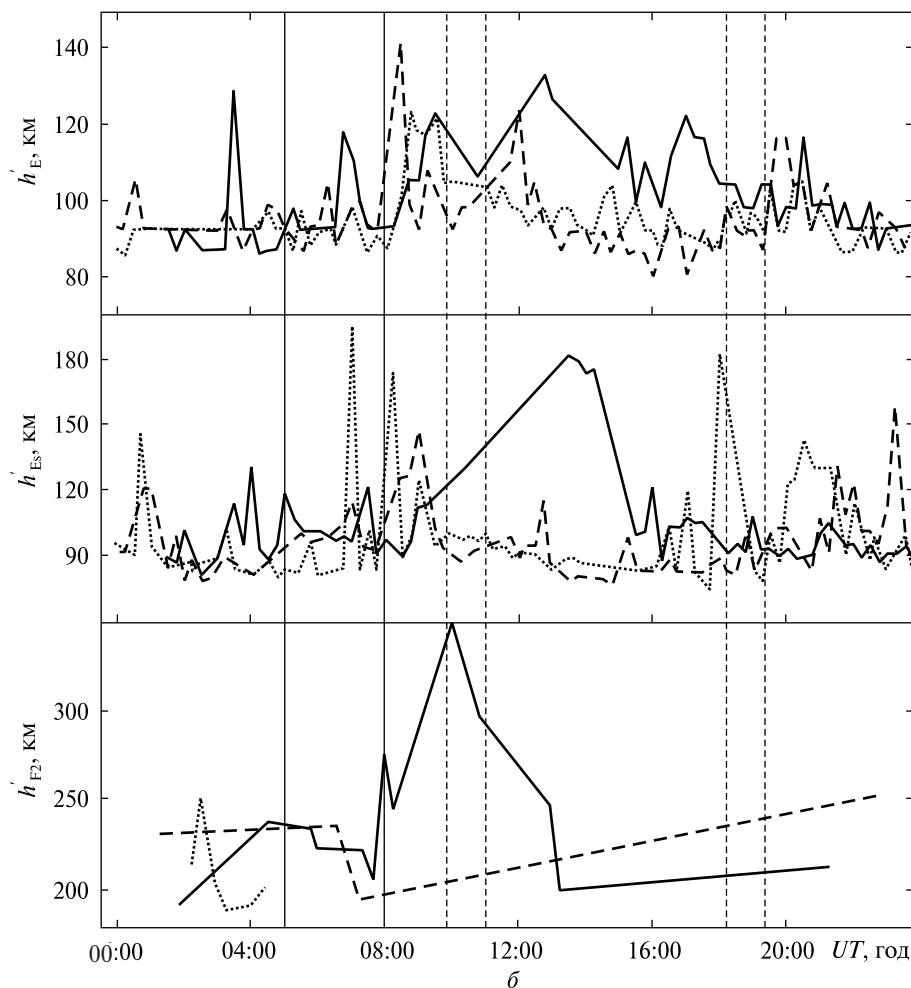


Рис. 5. Закінчення

Радіостанція Hwaseong — Harbin. Радіостанція, що працює на частоті 6015 кГц, дислокована у Південній Кореї ($R \approx 950$ км). Станція була вимкнена в інтервалі часу 00:00...03:30. 2 серпня 2019 р. доплерівські спектри були дифузними переважно в околиці вечірнього і ранкового термінаторів (рис. 7). 6 серпня 2019 р. доплерівські спектри були практично одномодовими. 5 серпня 2019 р. дифузність істотно збільшилася в інтервалах часу 07:00...14:00 та 17:00...19:30. Крім того, з 10:00 до 14:00 рееструвалися квазіперіодичні варіації $f_D(t)$ з періодом $T \approx 20$ хв і амплітудою $f_{Da} \approx 0.2$ Гц. З 07:00 до 11:00 5 серпня 2019 р. відзначалися значні (до 15 дБВ) варіації $A(t)$. Варіацій у контрольні дні не було.

Радіостанція Chiba / Nagara — Harbin. Радіопередавальний пристрій, який випромінює на частоті 6055 кГц, перебуває на території Японії ($R \approx 1610$ км). Випромінювання вимикалося з 15:00 до 22:00. 2 серпня 2019 р. в інтервалі часу 06:00...15:00 доплерівські спектри були дифузними (рис. 8). У день іоносферної бурі дифузність помітно посилилася. Приблизно з 09:00 до 15:00 доплерівські спектри займали смугу частот від -1.5 до 1.5 Гц. 6 серпня 2019 р. доплерівські спектри були практично одномодовими. Доплерівське зміщення частоти поблизу вечірнього термінатора змінювалося від -0.5 до 0.5 Гц.

5 серпня 2019 р. з 06:00 до 15:00 варіації $A(t)$ у межах 10 дБВ були квазіперіодичними. Пере-

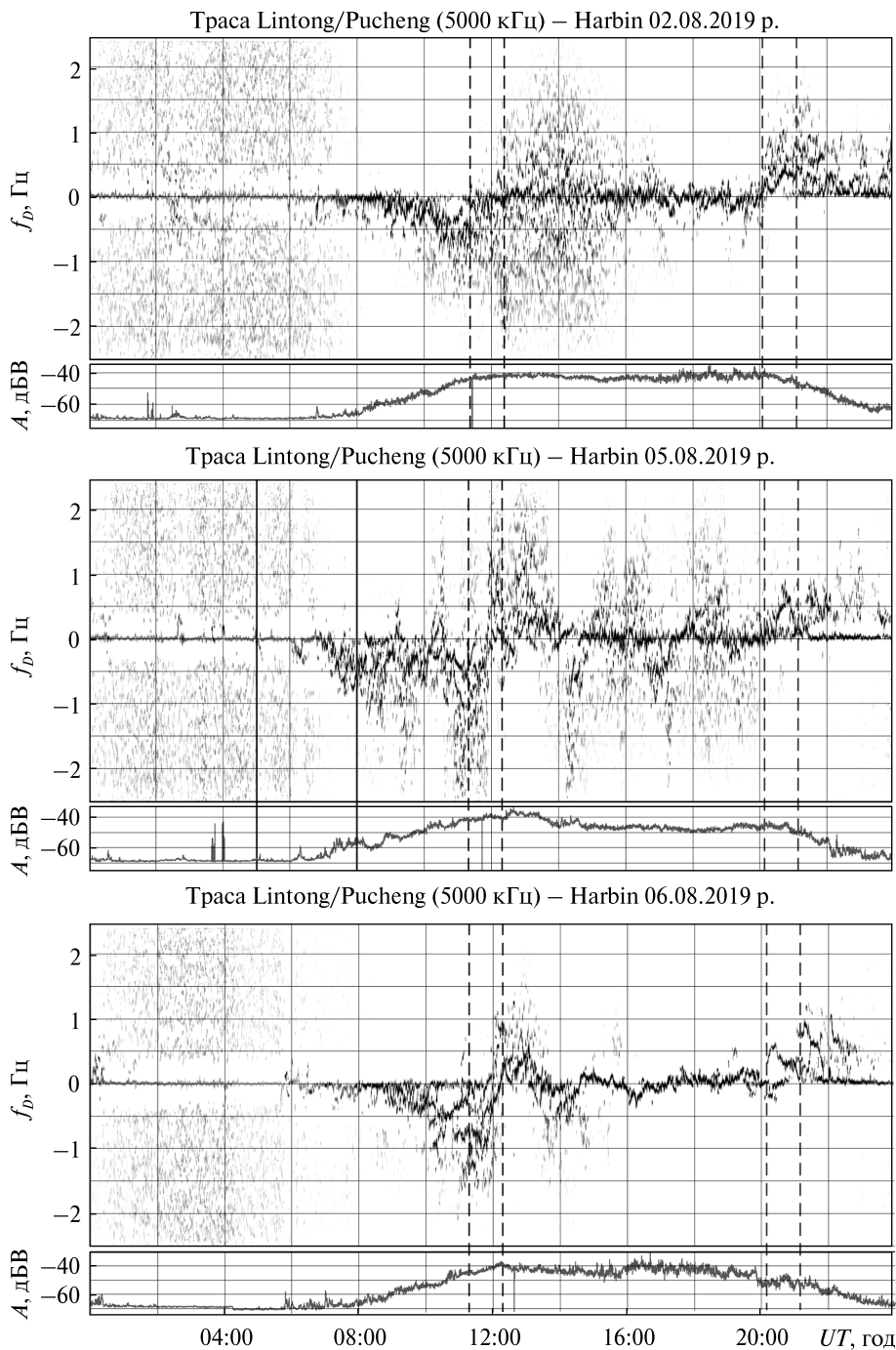


Рис. 6. Часові варіації доплерівських спектрів і амплітуд сигналу на радіотрасі Lintong / Pucheng — Harbin 2, 5 і 6 серпня 2019 р. (панелі зверху вниз). Суцільними вертикальними лініями показано інтервал часу, що відповідає головній фазі магнітної бурі, а штриховими лініями — моменти часу заходу і сходу Сонця на рівні Землі і на висоті 100 км

важали гармоніки з $T \approx 40$ хв. Подібний ефект не спостерігався у контрольні дні.

Радіотраса Beijing — Harbin. Радіостанція, що працює на частоті 6175 кГц, дислокована

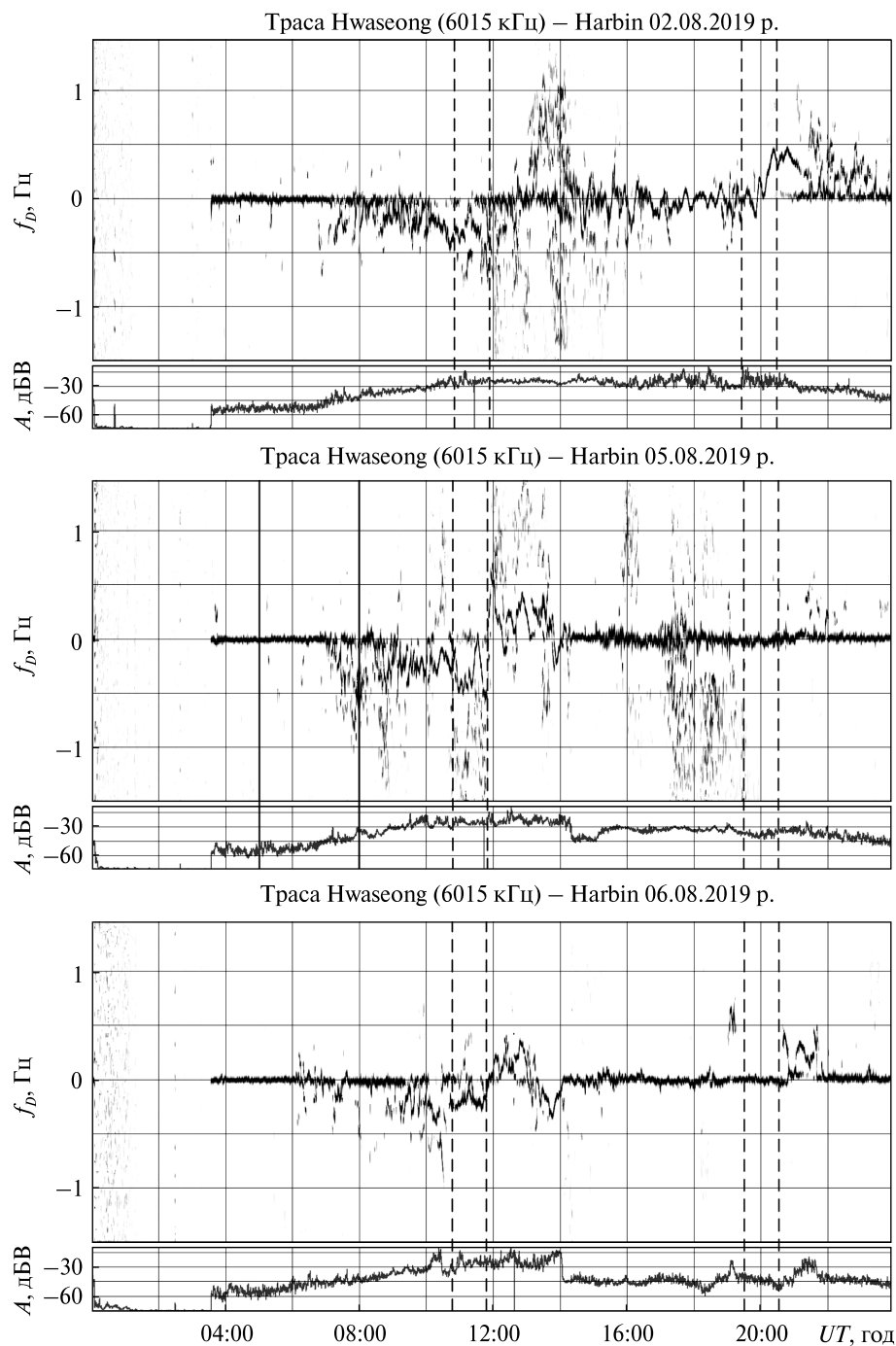


Рис. 7. Те ж, що на рис. 6, для радіотраси Hwaseong — Harbin

на території Китаю ($R \approx 1050$ км). Радіостанція припиняла мовлення з 00:00 до 07:00 і з 18:05 до 20:10. 5 серпня 2019 р., на відміну від контрольних днів, мало місце більше розширення доп-

плерівських спектрів (рис. 9). Крім того, в інтервалі часу 11:00...14:00 величина $f_D(t)$ змінювалася по квазіперіодичному закону з $T \approx 24$ хв, $f_{Da} \approx 0.20...0.25$ Гц і тривалістю $\Delta T \approx 180$ хв.

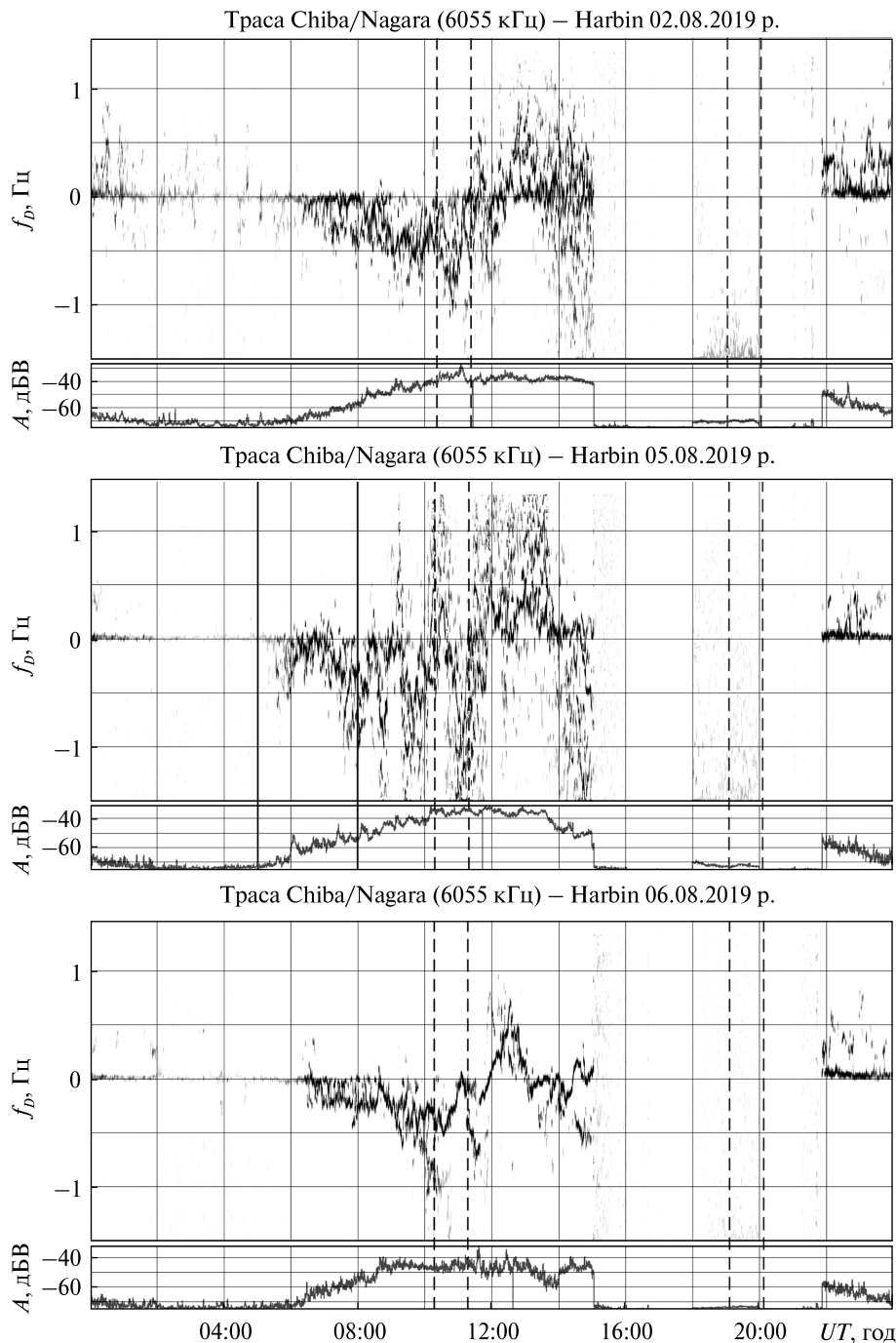


Рис. 8. Те ж, що на рис. 6, для радіотраси Chiba / Nagara — Harbin

Варіації $A(t)$ в день іоносферної бурі і в контрольні дні практично не відрізнялися.

Радіотраса Goyang — Harbin. Радіостанція, що випромінює на частоті 6600 кГц, розташована на

території Кореї ($R \approx 910$ км). Реєстрація сигналу була відсутня з 00:00 до 09:00. У день іоносферної бурі доплерівські спектри помітно відрізнялися від спектрів у контрольні дні (рис. 10). По-

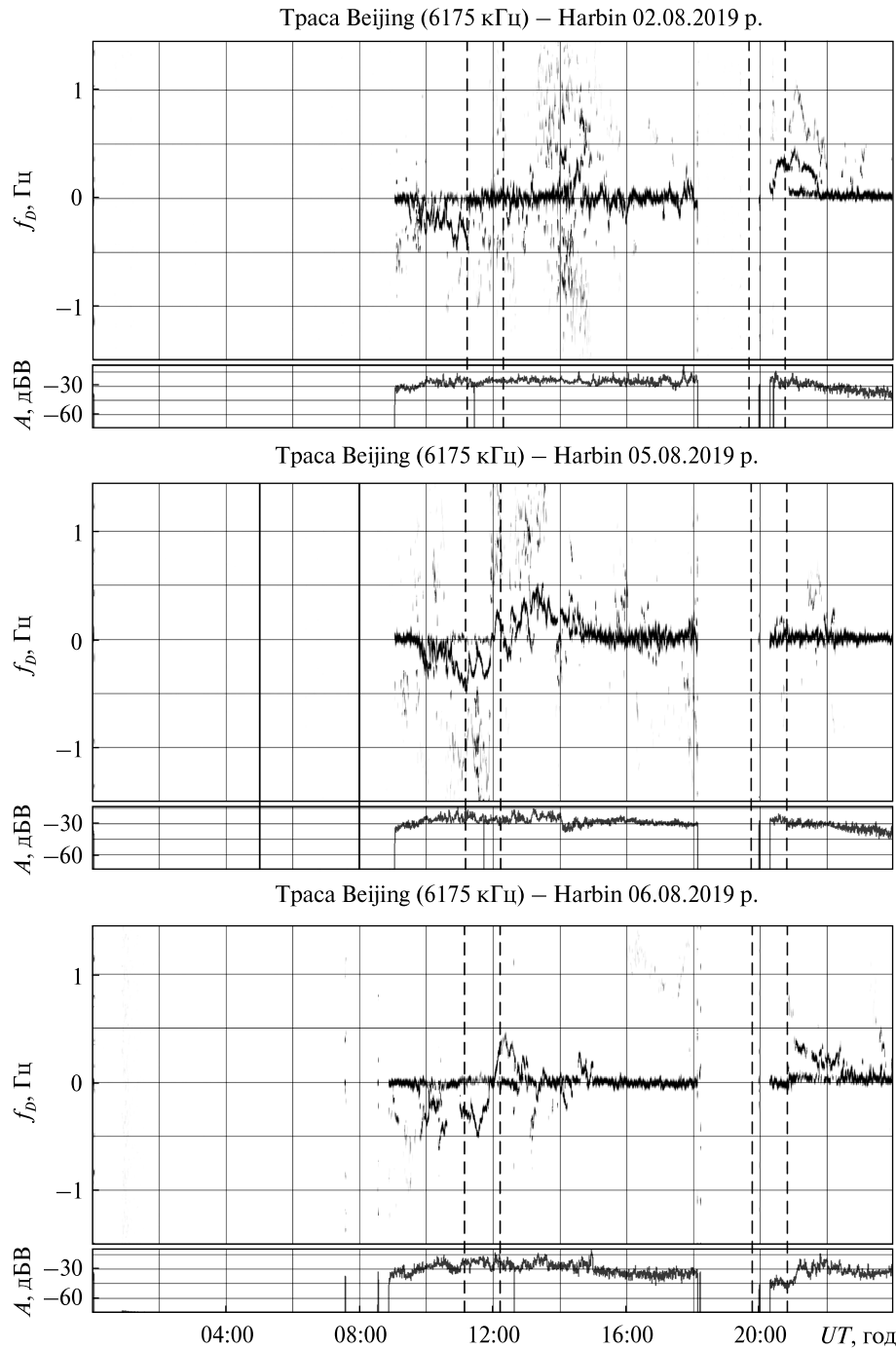


Рис. 9. Те ж, що на рис. 6, для радіотраси Beijing — Harbin

перше, вони були більш дифузними. По-друге, в інтервалі часу 09:00...14:00 варіації $f_D(t)$ були квазіперіодичними з $T \approx 24$ хв і $f_{D\alpha} \approx 0.20 \dots 0.25$ Гц. Їхня тривалість була не меншою за 240 хв.

Відмінностей в характері варіацій $A(t)$ не виявлено.

Радіотраса Ulaanbaatar — Harbin. Радіопередавальний пристрій, що працює на частоті

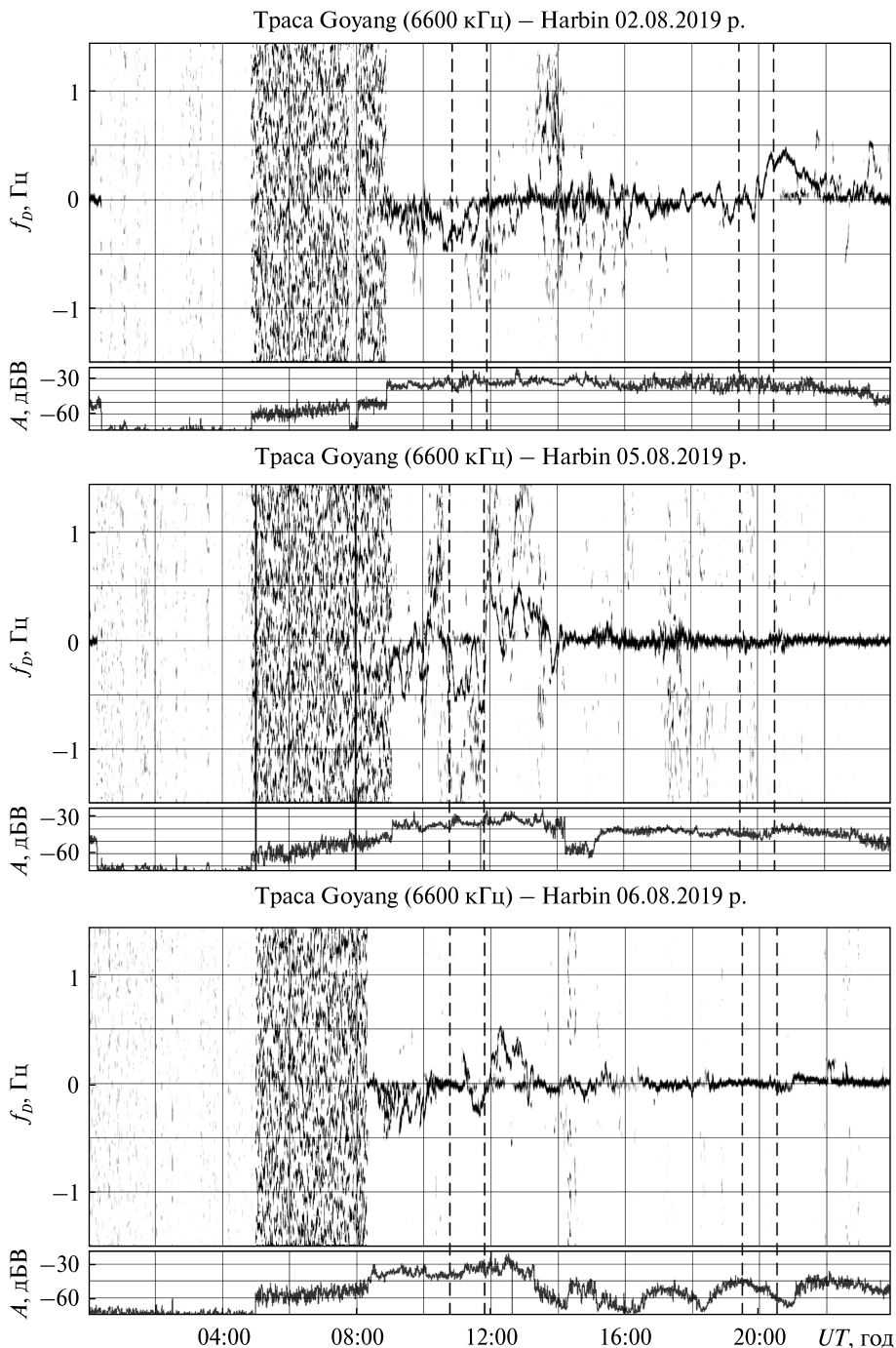


Рис. 10. Те ж, що на рис. 6, для радіотраси Goyang — Harbin

7260 кГц, розташований на території Монголії ($R \approx 1496$ км). Пристрій відключався з 05:00 до 07:00 і з 18:00 до 20:25. 5 серпня 2019 р. поведінка доплерівських спектрів значно відрізнялася

від поведінки спектрів у контрольні дні (рис. 11). Доплерівські спектри були дифузними. Вони займали смугу частот від -1.5 до 1.5 Гц. Крім того, в інтервалі часу 08:00...10:00 відбувалися

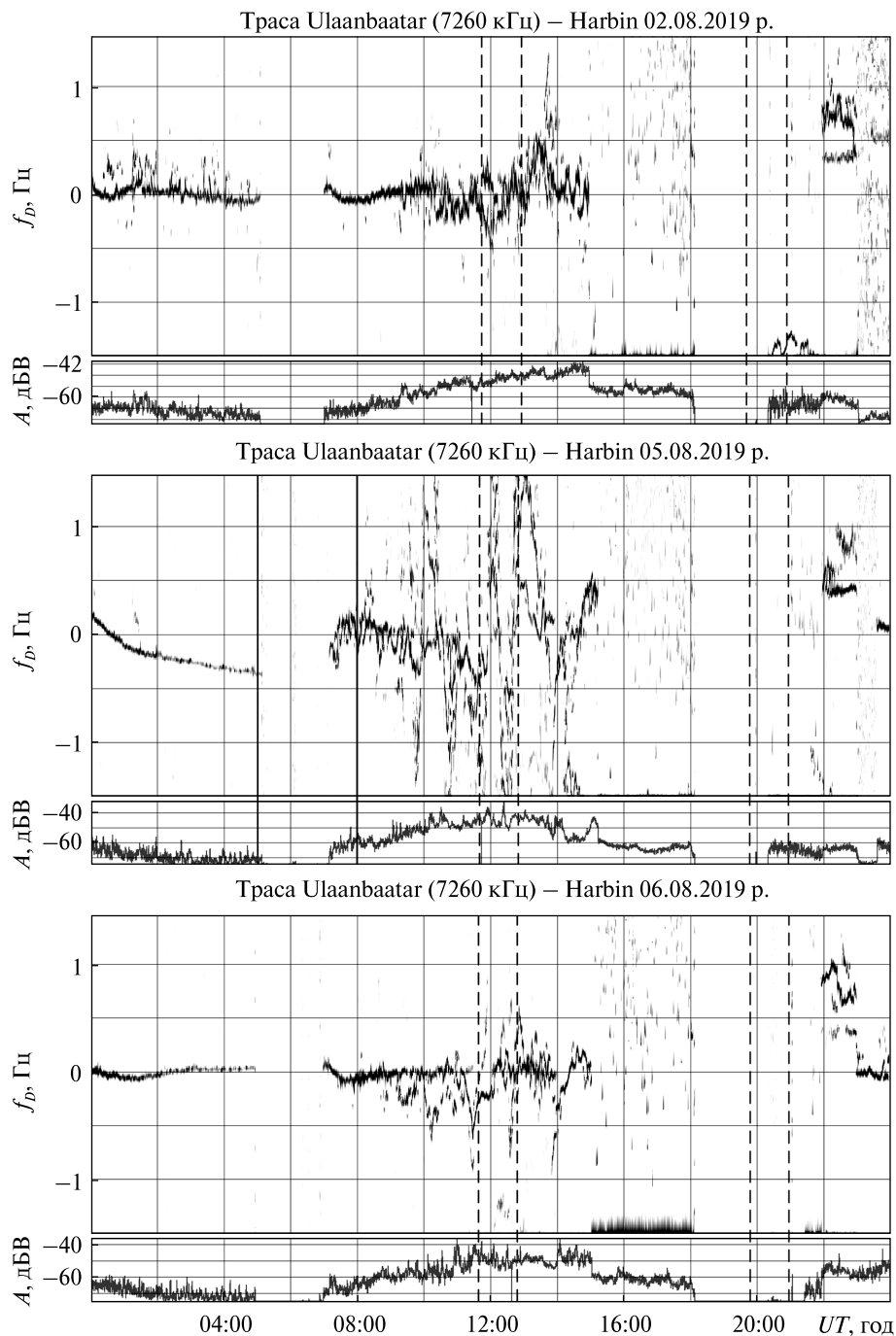


Рис. 11. Те ж, що на рис. 6, для радіотраси Ulaanbaatar – Harbin

квазіперіодичні варіації $f_D(t)$ з періодом $T \approx 25 \dots 30$ хв, $f_{Da} \approx 0.15 \dots 0.20$ Гц і $\Delta T \approx 120$ хв.

Істотних відмінностей поведінки $A(t)$ 2, 5 і 6 серпня 2019 р. не помічено.

Радіотраса Yakutsk – Harbin. Радіостанція, що випромінює на частоті 7345 кГц, розташована на території Росії. Довжина радіотраси приблизно дорівнює 1845 км. Радіостанція випромінювала

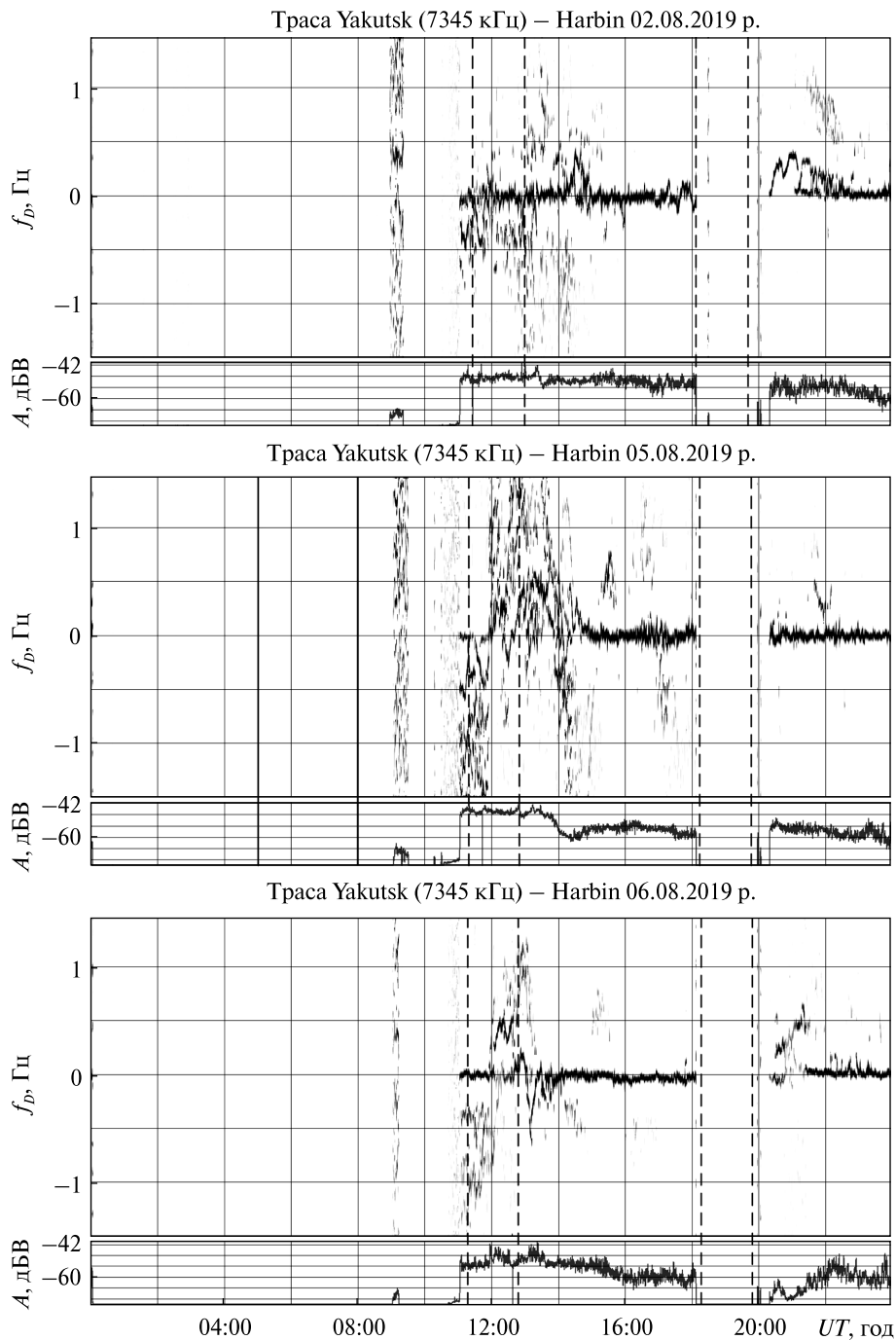


Рис. 12. Те ж, що на рис. 6, для радіотраси Yakutsk — Harbin

в інтервалі часу 11:00...18:05. У день іоносферної бурі доплерівські спектри були більш дифузними, ніж у контрольні дні (рис. 12).

Варіації $A(t)$ 5 серпня 2019 р. досягали 6...12 дБВ.

Радіопаса Shijiazhuang — Harbin. Радіопередавальний пристрій, який випромінює на частоті 9500 кГц, перебуває на території Китаю ($R \approx 1310$ км). У день іоносферної бурі вимикан-

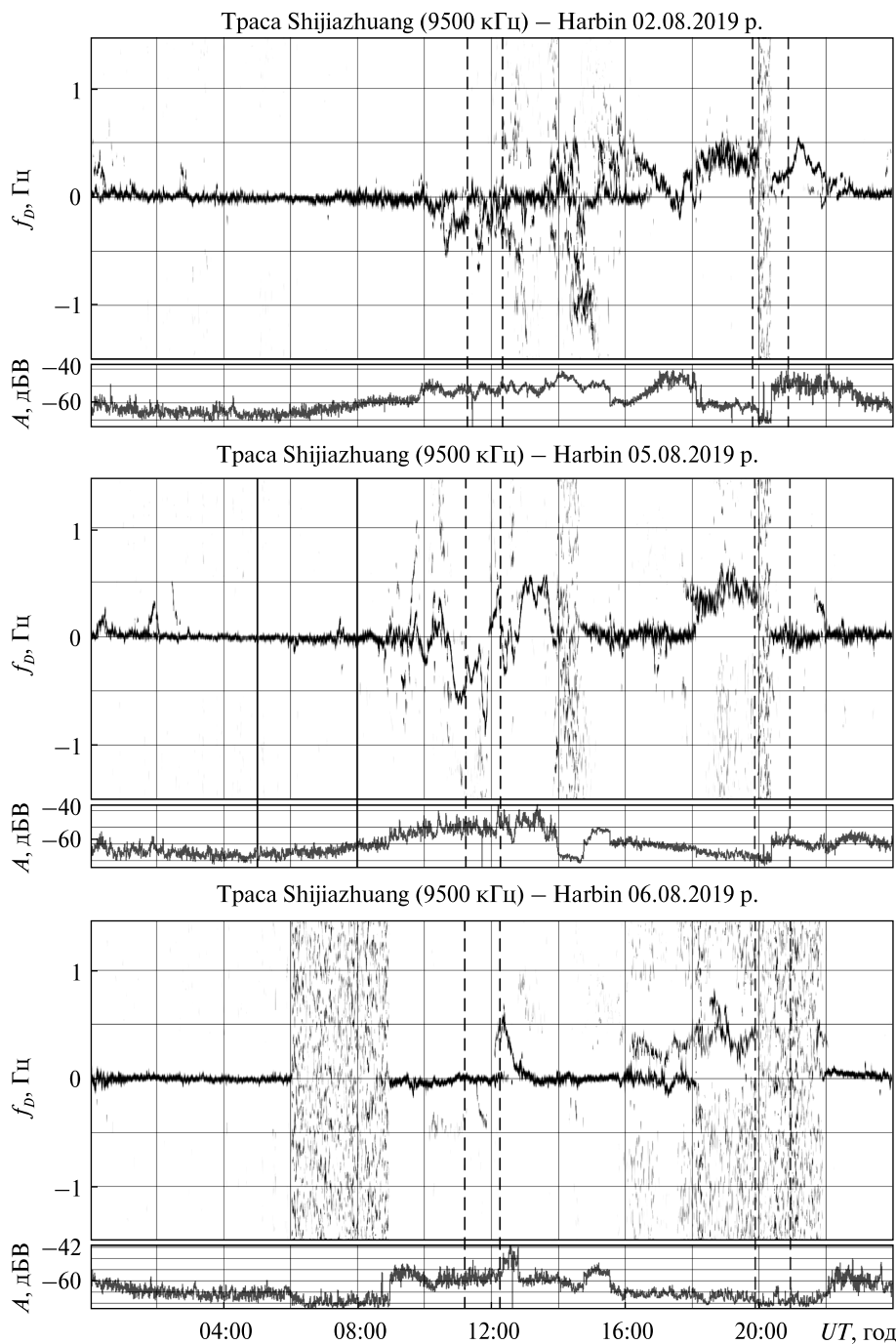


Рис. 13. Те ж, що на рис. 6, для радіотраси Shijiazhuang — Harbin

ня радіосигнального пристрою були нетривалими. Поведінка доплерівських спектрів 5 серпня 2019 р. помітно відрізнялася від поведінки спектрів у контрольні дні (рис. 13). В інтервалі часу

09:00...14:00 відзначалися квазіперіодичні варіації $f_D(t)$ з $T \approx 30$ хв, $f_{D_0} \approx 0.1...0.3$ Гц і $\Delta T \approx 240$ хв.

Варіації $A(t)$ 2, 5 і 6 серпня 2019 р. мало чим відрізнялися.

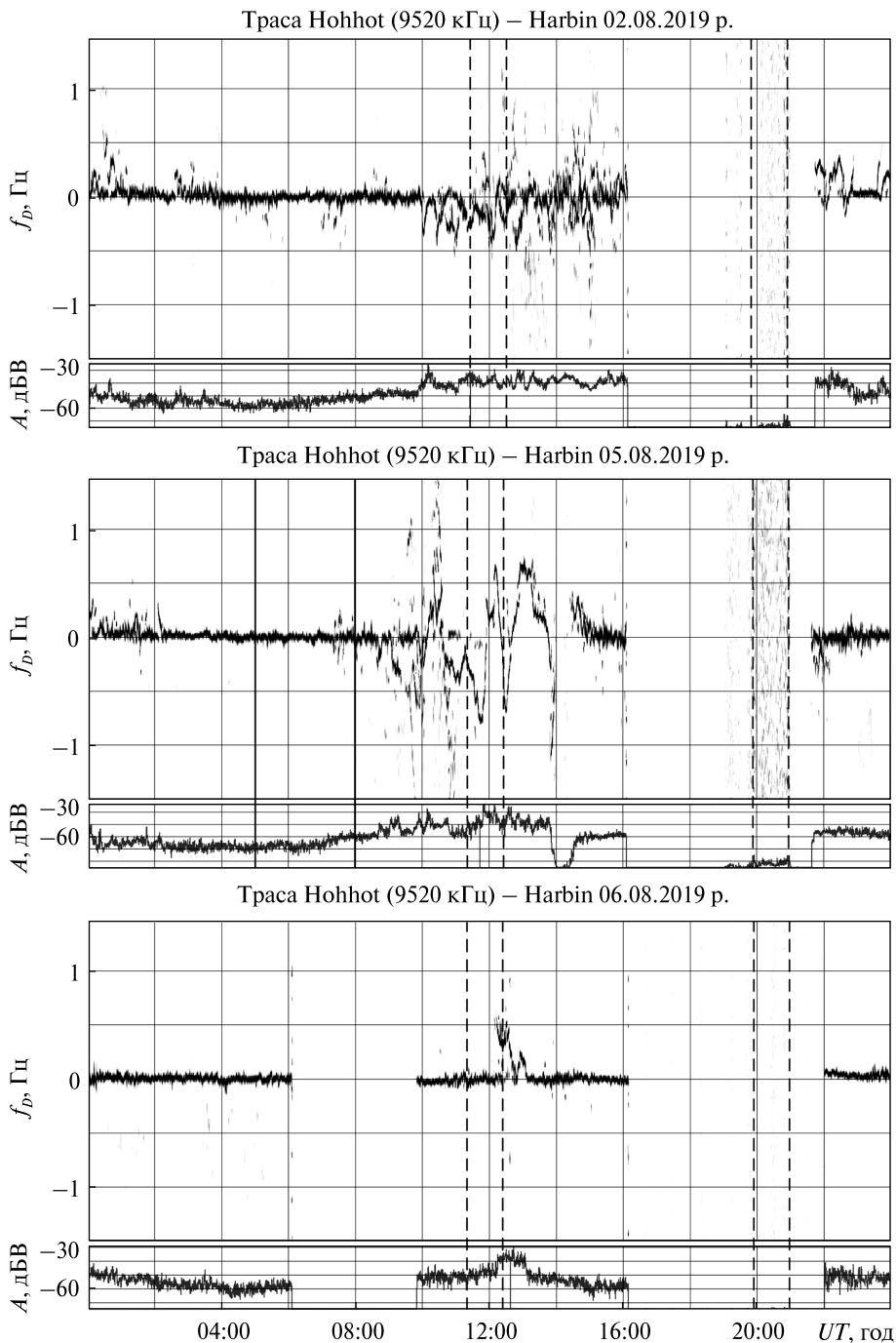


Рис. 14. Те ж, що на рис. 6, для радіотраси Hohhot – Harbin

Радіотраса Hohhot – Harbin. Радіостанція, що випромінює на частоті 9520 кГц, розташована на території Китаю ($R \approx 1340$ км). У день іоносферної бурі станція відключалася з 16:05 до 21:40.

5 серпня 2019 р. варіації доплерівських спектрів значно відрізнялися від варіацій спектрів у контрольні дні (рис. 14). З 10:00 до 14:00 мали місце аномально великі (від -0.7 до 0.7 Гц) квазі-

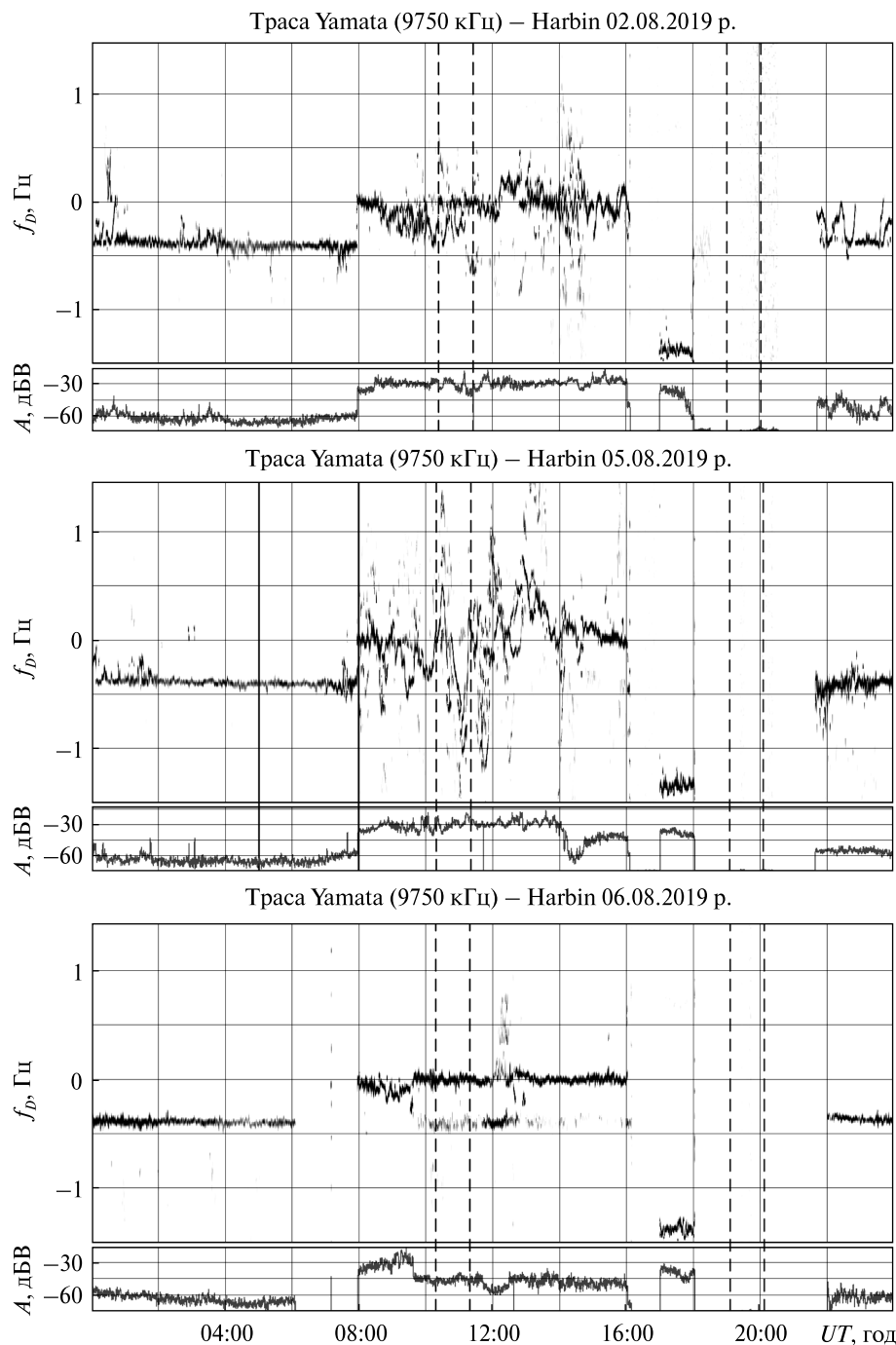


Рис. 15. Те ж, що на рис. 6, для радіотраси Yamata – Harbin

періодичні варіації $f_D(t)$. При цьому $T \approx 40$ хв, а $\Delta T \approx 240$ хв.

Істотної різниці варіацій $A(t)$ 2, 5 і 6 серпня 2019 р. не помічено.

Радіотраса Yamata – Harbin. Радіопередавальний пристрій, який випромінює на частоті 9750 кГц, дислоковано на території Японії ($R \approx 1570$ км). Понад третину доби радіовипромі-

нювання було відсутнє. З 08:00 до 16:00 у контрольну добу доплерівські спектри були практично одномодовими (рис. 15). 6 серпня 2019 р. з 10:00 до 14:00 спостерігалася мода від іншої радіостанції. 5 серпня 2019 р. доплерівські спектри були дифузними. Вони займали смугу частот від -1.5 до 1 Гц.

Поведінка амплітуд 2, 5 і 6 серпня 2019 р. мало відрізнялася.

ОБГОВОРЕННЯ

Геокосмічна буря 5—6 серпня 2019 р. була однією з найпомітніших за інтенсивністю та тривалістю в 2019 р.

Геокосмічна буря призвела до суттєвих збурень геомагнітного поля, які тривали не менше двох діб. Рівень і середнє квадратичне відхилення всіх складових геомагнітного поля помітно збільшилися. Частота флуктуацій значно збільшилася. На порядок збільшився рівень флуктуацій геомагнітного поля в діапазоні періодів $1...1000$ с. Найбільшу амплітуду мали гармоніки з періодом $400...600$ с для D -складової і $700...900$ с для H -складової.

Геокосмічна буря викликала істотні збурення в F -області іоносфери, особливо у період руху по іоносфері сонячного термінатора, практично не зачепивши E -області іоносфери. Ці збурення позначилися на характеристиках радіохвиль у діапазоні частот $5...10$ МГц. На всіх радіотрасах спостерігалася помітне розширення доплерівських спектрів. Це свідчило про посилення плазмової турбулентності в іоносфері та посилення розсіювання радіохвиль, що і призводило до багатопроменевості. Помітно змінювалася поведінка основної моди у відбитому від іоносфери сигналі. На ряді радіотрас спостерігалися квазіперіодичні варіації доплерівського зсуву частоти з періодами від 20 до 40 хв і тривалістю $120...240$ хв. Ці варіації викликані поширенням атмосферних гравітаційних хвиль, які модулюють концентрацію електронів N в іоносфері згідно з періодичним законом. Амплітуду відносних збурень N можна оцінити зі співвідношення [22, 23]

$$\delta_{Na} = \frac{K}{4\pi} \frac{cT}{L} \frac{f_{Da}}{f}, \quad (1)$$

де

$$K = \frac{1 + \sin \theta}{(1 + 2\zeta \operatorname{tg}^2 \theta) \cos \theta}$$

— коефіцієнт, залежний від траєкторії радіохвилі, c — швидкість світла, f_{Da} — амплітуда квазіперіодичного коливання з періодом T , f — частота радіохвилі, $\zeta = z_r / r_0$, $\operatorname{tg} \theta = R / (2z_r)$, $L \approx 2H$, z_r — висота відбиття радіохвилі, $r_0 \approx 6400$ км — радіус Землі, θ — кут падіння радіохвилі на іоносферу, відлічуваний від вертикалі, L — характерний висотний масштаб зміни δ_{Na} , H — висота однорідної атмосфери.

Співвідношення (1) передбачає, що

$$\delta_N(t, z) = \delta_{Na}(z_0) \exp\left(\frac{z - z_0}{2H}\right) \cos \frac{2\pi t}{T}.$$

Тут z_0 — висота початку шару з атмосферною гравітаційною хвилею.

Оцінки за співвідношенням (1), наприклад, для радіотраси Ulaanbaatar — Harbin дають при $2H \approx 30$ км $\delta_{Na} = 10...16$ %, а для радіотраси Shijiazhuang — Harbin при $2H \approx 50$ км — $\delta_{Na} = 3...10$ %. Аномально великі амплітуди коливань N були на радіотрасі Hohhot — Harbin, при цьому $\delta_{Na} = 80...90$ %.

Підтверджено, що геокосмічні бурі супроводжуються посиленням хвильової активності в діапазоні атмосферних гравітаційних хвиль. Ці хвилі генеруються в зоні полярного овалу і поширюються до середніх широт [26, 28, 31].

На більшості радіотрас іоносферна буря не вплинула помітним чином на амплітуду сигналу. Це означає, що нижня іоносфера, яка визначає амплітуду сигналу, протягом даної іоносферної бурі практично не збурювалася.

В цілому іоносферна буря істотно вплинула на ефекти термінатора. Можна стверджувати, що мала місце синергетична взаємодія двох потужних джерел збурення іоносфери.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Збільшення основних параметрів сонячного вітру 5 серпня 2019 р. призвело до геокосмічної бурі, яка спостерігалася в основному 5 і 6 серпня 2019 р.

2. Головна фаза магнітної бурі мала місце 5 серпня 2019 р. з 06:00 до 08:30 УТ. Фаза відновлення тривала не менше 4 діб.

3. Магнітна буря виявлялася в істотних варіаціях всіх складових геомагнітного поля та збільшенні на порядок рівня коливань геомагнітного поля в діапазоні періодів 400...950 с.

4. Протягом іоносферної бурі мали місце значні збурення F-області іоносфери. E-область іоносфери залишалася практично незбуреною.

5. Іоносферна буря істотно вплинула на доплерівські спектри радіохвиль в діапазоні частот 5...10 МГц. Мали місце значне розширення доплерівських спектрів, варіації доплерівського зсуву частоти і його квазіперіодичні зміни з періодом 20...40 хв і тривалістю 120...240 хв.

6. Квазіперіодичні варіації доплерівського зсуву частоти зумовлені квазіперіодичними варіаціями концентрації електронів, амплітуда їхніх відносних збурень змінювалася від 3 до 16 %.

7. На одній з трас амплітуда доплерівського зсуву частоти сягала 0.7 Гц. При цьому величина δ_{Na} могла досягати 80...90 %.

8. Іоносферна буря незначно вплинула на амплітуду сигналу на більшості радіотрас.

У даній публікації використовуються дані, записані в Низькочастотній обсерваторії, що належить Інституту радіоастрономії НАН України, відділу радіофізики геокосмосу, лабораторії електромагнітного оточення Землі. Автори дякують співробітникам обсерваторії за їхню роботу.

Роботу виконано в рамках Договору про співпрацю між Харківським національним університетом імені В. Н. Каразіна та Харбінським інженерним університетом. Робота Л. Ф. Черногора і У. Люо фінансово підтримана Національним фондом досліджень України, проект 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера». Робота К. П. Гармаша, Л. Ф. Черногора і С. М. Шульги частково підтримувалася в рамках держбюджетної НДР, заданої МОН України, державний номер 0119U002538. Робота Q. Guo, Y. Zheng частково підтримана грантом КНР (номер гранта 2018YFE0206500).

ЛІТЕРАТУРА

1. Владимирский Б. М., Темурьянц Н. А., Мартынюк В. С. *Космическая погода и наша жизнь*. Фрязино: Век 2. 2004. 224 с.
2. Мирошниченко Л. И. Проблема «Солнце—Земля»: современные концепции и физические механизмы. *Космічна наука і технологія*. 2011. 17, № 1. С. 17—22.
3. Мирошниченко Л. И. *Физика Солнца и солнечно-земных связей*: учеб. пособие. М.: Университетская книга. 2011. 174 с.
4. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008. 48, № 5. С. 681—702.
5. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Поднос В. А., Тырнов О. Ф. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина — средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах. *Космический проект «Ионосат-Микро»*. К.: Академперіодика, 2013. С. 160—182.
6. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. *Физика геокоsmических бурь*: Монография. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, 2014. 408 с.
7. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Guo Qiang, Zheng Yu, Поднос В. А., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Цимбал А. М. Когерентный многочастотный многотрасовый комплекс для радиофизического мониторинга динамических процессов в ионосфере. *Вісник Харків. нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна. Сер. «Радіофізика та електроніка»*. 2018. 28. С. 88—93.
8. Appleton E., Ingram L. Magnetic storms and upper atmospheric ionization. *Nature*. 1935. 136. P. 548—549.
9. Benestad R. E. *Solar activity and Earth's climate*. Springer-Praxis. 2002. 287 p.
10. Blagoveshchensky D., Sergeeva M. Impact of geomagnetic storm of September 7—8, 2017 on ionosphere and HF propagation: A multi-instrument study. *Adv. Space Res.* 2019. 63, № 1. P. 239—256. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117718305787> (дата звернення: 23.12.2019).
11. 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. *Ann. Geophys.* 23. P. 3027—3034.

12. Borries C., Berdermann J., Jakowski N., Wilken V. Ionospheric storms — A challenge for empirical forecast of the total electron content. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018. **120**, № 4. P. 3175—3186. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2015JA020988> (дата звернення: 23.12.2019).
13. Bothmer V., Daglis I. *Space Weather: Physics and Effects*. New York, Springer-Verlag, 2006.
14. Buonsanto M. Ionospheric storms — A review. *Space Sci. Revs.* 1999. **88**, № 3-4. P. 563—601.
15. Carlowicz M. J., Lopez R. E. *Storms from the Sun*. Washington DC: Joseph Henry Press, 2002.
16. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Y. *Physical Effects of the Severe Ionospheric Storm of 26 August 2018*. Fifth UK—Ukraine—Spain Meeting on Solar Physics and Space Science. Programme, Abstracts, information. P. 33.
17. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Y. *Physical Processes Operating in the Ionosphere after the Earthquake of Richter Magnitude 5.9 in Japan on July 7, 2018*. Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts. International Conference. May 28 — May 31, 2019. P. 87—88.
18. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Y. *Effects of the Severe Ionospheric Storm of 26 August 2018*. Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts. International Conference. May 28 — May 31, 2019. P. 88—90.
19. Freeman J. W. *Storms in Space*. London, New York: Cambridge University Press, 2001.
20. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Roble R. G., Richmond A. D. *How does the thermosphere and ionosphere react to a geomagnetic storm?* Magnetic Storms. Washington, 1997, P. 203—226. (AGU Monograph. vol. 98). DOI: 10.1029/GM098.
21. Goodman J. M. *Space Weather and Telecommunications*. Springer, 2005.
22. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Zheng Y. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2019. **186**. P. 88—103.
23. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Zheng Y. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere over China during the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Sci.* 2020. **55**, № 2. e2019RS006866.
24. Guo Q., Zheng Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T. Passive HF Doppler Radar for Oblique-Incidence Ionospheric Sounding. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering. Lviv, Ukraine, July 2—6, 2019. P. 88—93.
25. Hafstad L., Tuve M. Further studies of the Kennelly-Heaviside layer by the echo-method. *Proc. Institute of Radio Engineers.* 1929. **17**, № 9. P. 1513—1521.
26. Hajkowicz L. Auroral electrojet effect on the global occurrence pattern of large scale travelling ionospheric disturbances. *Planet. and Space Sci.* 1991. **39**, № 8. P. 1189—1196.
27. Lathuillière C., Menvielle M., Lilensten J., Amari T., Radicella S. M. From the Sun's atmosphere to the Earth's atmosphere: an overview of scientific models available for space weather developments. *Ann. Geophys.* 2002. **20**, № 7. P. 1081—1104.
28. Lei J., Burns A. G., Tsugawa T., Wang W., Solomon S. C., Wiltberger M. Observations and simulations of quasiperiodic ionospheric oscillations and large-scale traveling ionospheric disturbances during the December 2006 geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.* 2008. **113**, № A6. A06310. DOI: 10.1029/2008JA013090.
29. Lilensten J., Bornarel J. *Space Weather. Environment and Societies*. Springer, 2006.
30. 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. P. 727—744. DOI: 10.1002/2015JA021832.
31. Lyons L. R., Nishimura Y., Zhang S.-R., Coster A. J., Bhatt A., Kendall E., Deng Y. Identification of auroral zone activity driving largescale traveling ionospheric disturbances. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. **124**, № 1. P. 700—714.
32. Matsushita S. A study of the morphology of ionospheric storms. *J. Geophys. Res.* 1959. **64**, № 4. P. 305—321.
33. Mendillo M. Storms in the ionosphere: patterns and processes for total electron content. *Rev. Geophys.* 2006. **44**, № 4. RG4001. DOI: 10.1029/2005RG000193.
34. Mosna Z., Kouba D., Knizova P. K., Buresova D., Chum J., Sindelarova T., Urbar J., Boska J., Saxonbergova — Jankovicova D. Ionospheric storm of September 2017 observed at ionospheric station Pruhonice, the Czech Republic. *Adv. Space Res.* 2020. **65**, № 1. P. 115—128.
35. Pirog O. M., Polekh N. M., Zherebtsov G. A., Smirnov V. F., 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. P. 1075—1080.
36. 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. P. 2464—2476.
37. Prölss G. W. Ionospheric F-region storms. *Handbook of atmospheric electrodynamics 2*. 1995. P. 195—248.
38. Prölss G. W. Ionospheric F-region Storms: Unsolved Problems. *Characterising the Ionosphere: Meeting Proceedings RTO-MP-IST-056, Paper 10*. Neuilly-sur-Seine, France: RTO, 2006, P. 10-1—10-20. URL: <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp> (дата звернення: 23.12.2019).

39. Shpynev B. G., Zolotukhina N. A., Polekh N. M., Ratovsky K. G., Chernigovskaya M. A., Belinskaya A. Yu., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Grigorieva S. A., Panchenko V. A., Korenkova N. A., 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**. P. 93—105. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.10.014. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136468261730617X> (дата звернення: 23.12.2019).
40. *Space Weather* (Geophysical Monograph). Eds Song P., Singer H., Siscoe G. Union, Washington, D.C. 2001.
41. Vijaya Lekshmi D., Balan N., Tulasi Ram S., Liu J. Y. Statistics of geomagnetic storms and ionospheric storms at low and mid latitudes in two solar cycles. *J. Geophys. Res.* 2011. **116**, A11328. DOI: 10.1029/2011JA017042.
42. Yakovchouk O. S., Mursula K., Holappa L., Veselovsky I. S., Karinen A. Average properties of geomagnetic storms in 1932—2009. *J. Geophys. Res.* 2012. **117**, № A3. DOI: 10.1029/2011JA017093.
43. Yamauchi M., Sergienko T., Enell C.-F., Schillings A., Slapak R., Johnsen M. G., Tjulin A., Nilsson H. Ionospheric response observed by EISCAT during the 6—8 September 2017 space weather event: Overview. *Space Weather*. 2018. **16**, № 9. P. 1437—1450. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018SW001937> (дата звернення: 23.12.2019).
44. Zolotukhina N. A., Kurkin V. I., Polekh N. M. Ionospheric disturbances over East Asia during intense December magnetic storms of 2006 and 2015: similarities and differences. *Solar-Terr. Phys.* 2018. **4**, №3. P. 28—42.

Стаття надійшла до редакції 23.12.2019; після доопрацювання 20.12.2020

REFERENCES

1. Vladimírsky B. M., Temuryants N. A., Martinuk V. S. (2004). *Cosmic Weather and our life*. Fryazino [in Russian].
2. Miroshnichenko L. I. (2011). The Sun — Earth Problem: Modern Concepts and Physical Mechanisms. *Space Sci. and Technology*, **17**(1), 17—22 [in Russian].
3. Miroshnichenko L. I. (2011). *Physics of the Sun and solar-terrestrial relations*. Moscow: Universitetskaya Kniga Publ. [in Russian].
4. Chernogor L. F. (2008). Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: Specific features and experimental results. *Geomagnetism and Aeronomy*, **48**(5), 652—673.
5. Chernogor L. F., Garmash K. P., Podnos V. A., Tyrnov O. F. (2013). The V. N. Karazin Kharkiv National University Radio physical Observatory — the tool for ionosphere monitoring in space experiments. Space Project “Ionosat-Micro”. Eds. S. A. Zasukha, O. P. Fedorov. Kyiv: Akadempriodika Publ., 160—182 [in Russian].
6. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Qiang, Zheng Yu, Podnos V. A., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Tsymbal A. M. (2018). The coherent multi-frequency multipath radio diagnostic system for radiophysical monitoring of dynamic processes at ionosphere. *Bull. V. N. Karazin Kharkiv national university. Radio Physics and Electronics*, **28**, 88—93 [in Russian].
7. Chernogor L. F., Domnin I. F. (2014). *Physics of geocosmic storms*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv Nat. Univ. Publ. [in Russian].
8. Appleton E., Ingram L. (1935). Magnetic storms and upper atmospheric ionization. *Nature*, **136**, 548—549.
9. Benestad R. E. (2002). *Solar activity and Earth's climate*. Springer-Praxis.
10. Blagoveshchensky D., Sergeeva M. (2019). Impact of geomagnetic storm of September 7—8, 2017 on ionosphere and HF propagation: A multi-instrument study. *Adv. in Space Res.*, **63**(1), 239—256. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117718305787> (Last accessed 23.12.2019).
11. Blanch E., Altadill D., Boška J., Burešová D., Hernández-Pajares M. (2005). November 2003 event: Effects on the Earth's ionosphere observed from ground-based ionosonde and GPS data. *Ann. Geophys.*, **23**, 3027—3034.
12. Borries C., Berdermann J., Jakowski N., Wilken V. (2018). Ionospheric storms — A challenge for empirical forecast of the total electron content. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **120**(4), 3175—3186. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2015JA020988> (Last accessed 23.12.2019).
13. Bothmer V., Daglis I. (2006). *Space Weather: Physics and Effects*. New York: Springer-Verlag.
14. Buonsanto M. (1999). Ionospheric storms — A review. *Space Sci. Revs.*, **88**(3-4), 563—601.
15. Carlowicz M. J., Lopez R. E. (2002). *Storms from the Sun*. Washington D C: Joseph Henry Press.
16. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Y. (2019). Physical Effects of the Severe Ionospheric Storm of 26 August 2018. *Fifth UK—Ukraine—Spain Meeting on Solar Physics and Space Science. Programme, Abstracts, information*, 33.
17. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Y. (2019). Physical Processes Operating in the Ionosphere after the Earthquake of Richter Magnitude 5.9 in Japan on July 7, 2018. *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts. International Conference. May 28 — May 31, 2019*, 87—88.

18. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Y. (2019). *Effects of the Severe Ionospheric Storm of 26 August 2018*. Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts. International Conference. May 28 — May 31, 2019, 88—90.
19. Freeman J. W. (2001). *Storms in Space*. London, New York: Cambridge Univ. Press.
20. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Roble R. G., Richmond A. D. (1997). *How does the thermosphere and ionosphere react to a geomagnetic storm?* Magnetic Storms. Washington, 203—226 (AGU Monograph., vol. 98). DOI: 10.1029/GM098.
21. Goodman J. M. (2005). *Space Weather and Telecommunications*. Springer.
22. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Zheng Y. (2019). Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **186**, 88—103.
23. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Zheng Y. (2020). Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere over China during the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Sci.*, **55**(2), e2019RS006866..
24. Guo Q., Zheng Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T. (2019). *Passive HF Doppler Radar for Oblique-Incidence Ionospheric Sounding*. IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering. Lviv, Ukraine, July 2—6, 2019, 88—93.
25. Hafstad L., Tuve M. (1929). Further studies of the Kennelly-Heaviside layer by the echo-method. *Proc. the Institute of Radio Engineers*, **17**(9), 1513—1521.
26. Hajkowicz L. (1991). Auroral electrojet effect on the global occurrence pattern of large scale travelling ionospheric disturbances. *Planet. and Space Sci.*, **39**(8), 1189—1196.
27. Lathuillière C., Menvielle M., Lilensten J., Amari T., Radicella S. M. (2002). From the Sun's atmosphere to the Earth's atmosphere: an overview of scientific models available for space weather developments. *Ann. Geophys.*, **20**(7), 1081—1104.
28. Lei J., Burns A.G., Tsugawa T., Wang W., Solomon S.C., Wiltberger M. (2008). Observations and simulations of quasiperiodic ionospheric oscillations and large-scale traveling ionospheric disturbances during the December 2006 geomagnetic storm. *J. Geophys. Res.*, **113**(A6), A06310. DOI: 10.1029/2008JA013090.
29. Lilensten J., Bornarel J. (2005). *Space Weather, Environment and Societies*. Berlin/New York: Springer.
30. Liu J., Wang W., Burns A., Yue X., Zhang S., Zhang Y., Huang C. (2016). Profiles of ionospheric storm-enhanced density during the 17 March 2015 great storm. *J. Geophys. Res.*, **121**(1), 727—744. DOI: 10.1002/2015JA021832.
31. Lyons L. R., Nishimura Y., Zhang S.-R., Coster A. J., Bhatt A., Kendall E., Deng Y. (2019). Identification of auroral zone activity driving largescale traveling ionospheric disturbances. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **124**(1), 700—714.
32. Matsushita S. (1959). A study of the morphology of ionospheric storms. *J. Geophys. Res.*, **64**(4), 305—321.
33. Mendillo M. (2006). Storms in the ionosphere: patterns and processes for total electron content. *Rev. Geophys.*, **44**(4), RG4001. DOI: 10.1029/2005RG000193.
34. Mosna Z., Kouba D., Knizova P. K., Buresova D., Chum J., Sindelarova T., Urbar J., Boska J., Saxonbergova-Jankovicova D. (2020). Ionospheric storm of September 2017 observed at ionospheric station Pruhonice, the Czech Republic. *Adv. Space Res.*, **65**(1), 115—128.
35. Pirog O.M., Polekh N.M., Zherebtsov G.A., Smirnov V.F., Shi J., Wang X. (2006). Seasonal variations of the ionospheric effects of geomagnetic storms at different latitudes of East Asia. *Adv. Space Res.*, **37**(5), 1075—1080.
36. Polekh N., Zolotukhina N., Kurkin V., Zherebtsov G., Shi J., Wang G., Wang Z. (2017). Dynamics of ionospheric disturbances during the 17—19 March 2015 geomagnetic storm over East Asia. *Adv. Space Res.*, **60**(11), 2464—2476.
37. Prölss G. W. (1995). *Ionospheric F-region storms*. Handbook of atmospheric electrodynamics. 2, 195—248.
38. Prölss G. W. (2006). Ionospheric F-region Storms: Unsolved Problems. Characterising the Ionosphere: *Meeting Proceedings RTO-MP-IST-056, Paper 10. Neuilly-sur-Seine, France: RTO*, 2006, 10-1—10-20. URL: <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp> (Last accessed 23.12.2019).
39. Shpynev B. G., Zolotukhina N. A., Polekh N. M., Ratovsky K. G., Chernigovskaya M. A., Belinskaya A. Yu., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Grigorieva S. A., Panchenko V. A., Korenkova N. A., Mielich J. (2018). 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.*, **180**, 93—105. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.10.014. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136468261730617X> (Last accessed 23.12.2019).
40. Song P., Singer H., Siscoe G. (Eds). (2001). *Space Weather (Geophysical Monograph)*. Union, Washington, D. C.
41. Vijaya Lekshmi D., Balan N., Tulasi Ram S., Liu J. Y. (2011). Statistics of geomagnetic storms and ionospheric storms at low and mid latitudes in two solar cycles. *J. Geophys. Res.*, **116**, A11328. DOI: 10.1029/2011JA017042.
42. Yakovchouk O. S., Mursula K., Holappa L., Veselovsky I. S., Karinen A. (2012). Average properties of geomagnetic storms in 1932—2009. *J. Geophys. Res.*, **117**(A3). DOI: 10.1029/2011JA017093.
43. Yamauchi M., Sergienko T., Enell C.-F., Schillings A., Slapak R., Johnsen M. G., Tjulín A., Nilsson H. (2018). Ionospheric response observed by EISCAT during the 6—8 September 2017 space weather event: Overview. *Space Weather*, **16**(9), 1437—1450. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018SW001937> (Last accessed 23.12.2019).

44. Zolotukhina N. A., Kurkin V. I., Polekh N. M. (2018). Ionospheric disturbances over East Asia during intense December magnetic storms of 2006 and 2015: similarities and differences. *Solar-Terr. Phys.*, **4**(3), 28—42.

Received 23.12.2019. Revised 20.12.2020

Y. Luo¹, Postgraduate at the Department of the Theoretic Radiophysics

Q. Guo², Ph. D., Professor

Y. Zheng³, Ph. D., Professor

K. P. Garmash¹, Senior Researcher at the Department of Space Radiophysics, Ph. D. in Phys. & Math.

L. F. Chernogor¹, Head of the Dреpartment of Space Radiophysics, Dr. Sci. in Phys. & Math., Professor

S. M. Shulga¹, The Dean of the School of Radiophysics, Biomedical Electronics and Computer Systems, Dr. Sci. in Phys. & Math., Professor

¹ V. N. Karazin National University of Kharkiv

4 Svobody Square, Kharkiv, 61022 Ukraine

² Harbin Engineering University

145-1 Nantong Str., Nangang District, Harbin, Heilongjiang Province, 150001 China

³ Qingdao University

308 Ning Xia Lu, Laoshan District, Qingdao, Shandong, 266071 China

GEOSPACE STORM EFFECTS ON AUGUST 5—6, 2019

Geospace storms are the synergistically interacting magnetic storms, ionospheric storms, atmospheric storms, and the storms in an electric field of magnetospheric, ionospheric, and atmospheric origins. Geospace storms are very diverse, and no two of them behave exactly the same. Therefore, studying the effects of each new storm becomes an urgent task for us. Such research will reveal both the general laws and individual characteristics of storm processes.

The purpose of this paper is to present general information about the geospace storm, the results of the analysis of features of magnetic and ionospheric storms.

To analyze the magnetic environment, we used the measurement results of magnetic field fluctuations in the range from 1 s to 1000 s, performed at the Magnetometric Observatory of V. N. Karazin Kharkiv National University, and variations of three components of the geomagnetic field, performed at the Low-frequency observatory of the IRA NASU. We analyzed the ionospheric environment using multi-frequency multi-path measurements performed at Harbin Engineering University (China) and also the data of ionosonde. The main results of the work are as follows. An increase in the main parameters of the solar wind on August 5, 2019, led to a geospace storm, which was mainly observed on August 5 and 6, 2019. The main phase of the magnetic storm took place on August 5, 2019, from 06:00 a. m. to 08:30 a. m. The recovery phase lasted at no less than 4 days. The magnetic storm shows significant variations of all components of the geomagnetic field, and there is an increase by order of magnitude of the oscillations' level of the geomagnetic field in the range from 400 s to 950 s. During the ionospheric storm, significant disturbances occurred in the F-region of the ionosphere. The E-region of the ionosphere remained weakly perturbed. The ionospheric storm has severely affected the Doppler spectra of radio waves in the 5—10 MHz frequency range. The Doppler spectra are significantly broadened, and the Doppler frequency shift and its quasi-periodic change with a period of 20—40 minutes and a duration of 120—240 minutes have taken place. The quasi-periodic variations of the Doppler frequency shift are due to quasi-periodic variations in the electron density, and the amplitude of their relative perturbations varied from 3 % to 16 %. On one of these paths, the amplitude of the Doppler frequency shift reached 0.7 Hz. And in this case, the amplitude of the relative perturbations of the electron concentration could reach 80—90 %. In addition, the ionospheric storm little affected the signal amplitude on most radio paths.

Keywords: geospace storm, magnetic storm, ionospheric storm, ionosphere oblique-incidence system, Doppler spectra, Doppler frequency shift, quasi-periodic variations, electron density.